This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

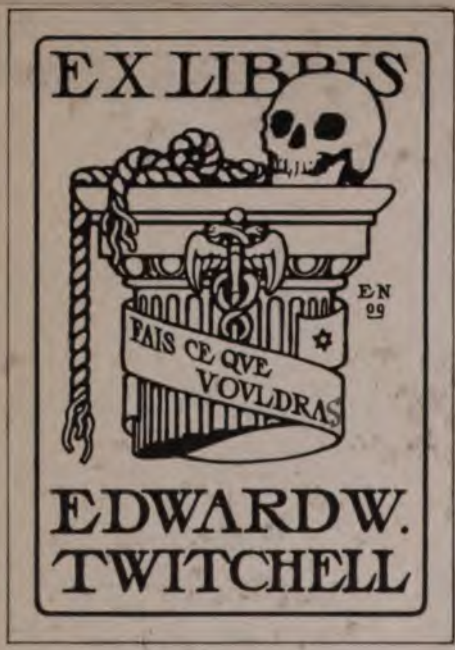
+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

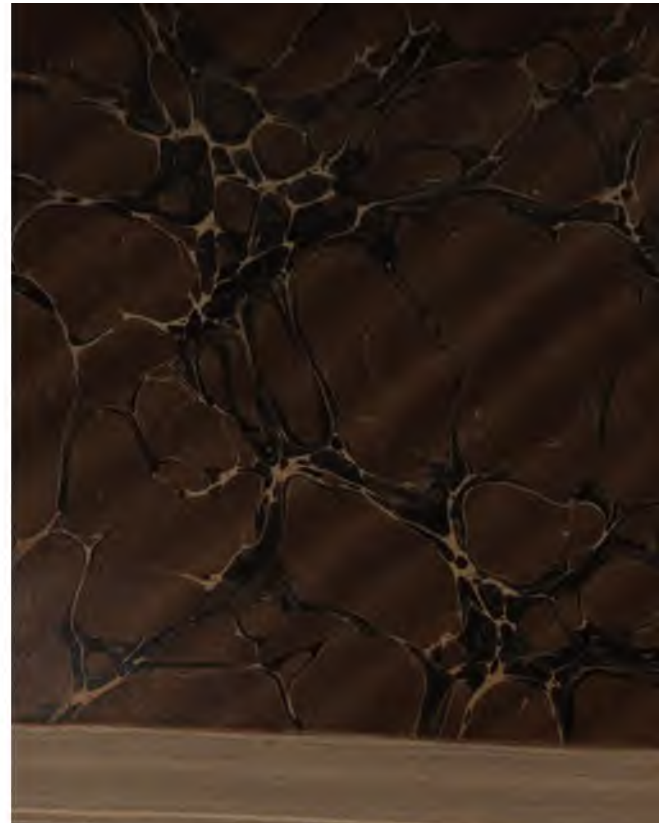
+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

LANE
MEDICAL LIBRARY





TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

DU MÊME AUTEUR

Cours de physique purement expérimentale et sans mathématiques, à l'usage des candidats au baccalauréat et des lycées de jeunes filles; 9e édition, complètement refondue et rédigée à nouveau, conformément aux plus récents programmes, par M. Maneuvrier. 1 volume in-16, de 695 pages, avec 580 figures et 2 planches en couleur, broché. . . . . 6 fr. »
Cartonnage toile . . . . . 6 fr. 50

25810. — Paris. Imprimerie Lahure, rue de Fleurus, 9.

Edmond W. Dunitcer
Paris 26 Jan 18

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE PHYSIQUE

PAR A. GANOT

VINGT-UNIÈME ÉDITION

ENTIÈREMENT REFONDUE ET RÉDIGÉE A NOUVEAU

Conformément aux plus récents programmes universitaires

PAR GEORGES MANÉUVRIER

Ancien élève de l'Ecole normale supérieure
Agrégé des sciences physiques et naturelles
Sous-Directeur du Laboratoire des Recherches (Physique) à la Sorbonne

CETTE ÉDITION COMPREND :

I. — EN GROS TEXTE :

LE COURS DE LA CLASSE DE MATHÉMATIQUES ÉLÉMENTAIRES ET DE PREMIÈRE-SCIENCES (MODERNE)

(Préparation aux baccalauréats ès sciences complets, Enseignement classique et Enseignement moderne, ainsi qu'aux examens de l'Ecole centrale, de l'Ecole forestière et de l'Ecole de Saint-Cyr.)

II. — EN PETIT TEXTE :

1° **LE COURS DE LA CLASSE DE MATHÉMATIQUES SPÉCIALES**

(Préparation à l'Ecole polytechnique et à l'Ecole normale supérieure.)

2° **UN RÉSUMÉ PUREMENT EXPÉRIMENTAL DE HAUTE OPTIQUE ET DE SACCHARIMÉTRIE**

(A l'usage des étudiants en médecine et en pharmacie.)

3° **DES NOTIONS DE MÉTÉOROLOGIE ET DE CLIMATOLOGIE**

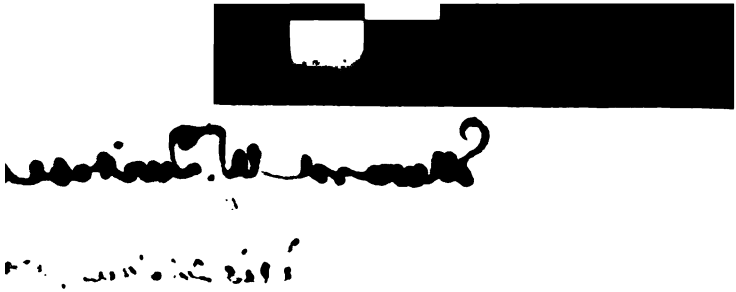
4° **UN CHOIX DE PROBLÈMES AVEC SOLUTIONS SUR TOUTES LES PARTIES DE LA PHYSIQUE**

OUVRAGE CONTENANT 1025 GRAVURES INTERCALÉES DANS LE TEXTE ET DEUX PLANCHES EN COULEUR

PARIS
LIBRAIRIE HACHETTE ET Cie
79, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 79

1894

Droits de traduction et de reproduction réservés.



B21
G19
1894

TRAITÉ
ÉLEMENTAIRE
DE PHYSIQUE

LIVRE I
MATIÈRE, MOUVEMENT ET FORCES

CHAPITRE PREMIER
NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

1. **Matière, corps, propriétés des corps. — Phénomènes physiques et chimiques.** — Il est impossible à l'homme d'exister sans être continuellement affecté par une infinité d'actions extérieures qu'exercent sur lui les objets et les êtres qui l'environnent, c'est-à-dire les *corps matériels* ou la *matière* de l'Univers.

Tout corps est caractérisé par l'ensemble de ses *propriétés*, c'est-à-dire par ses divers modes d'action dans les diverses circonstances où il est placé. Les manifestations de ces modes d'action constituent les *phénomènes naturels* ou simplement *phénomènes*[1].

Ces phénomènes sont de deux ordres. Les uns ne subsistent pas au delà des circonstances qui les ont provoqués : on les appelle *phénomènes physiques*. Ainsi une pierre qu'on isole de tout support tombe vers le sol. L'eau, qui dans l'atmosphère existe normale-

1. Ce mot n'a pas dans la science la même signification que dans le langage ordinaire, où il désigne un fait rare et surprenant ou bien un objet monstrueux. Il vient du grec φαινόμενον, *qui signifie chose qui apparaît.*

54785

ment à l'état de vapeur, peut retomber sur la terre en neige ou en pluie. Les métaux se dilatent ou se contractent, suivant qu'ils sont exposés à la chaleur ou au froid. La pierre d'aimant, qui est sans action sur une aiguille de cuivre, attire ou repousse l'aiguille d'acier aimantée qu'on lui présente. L'ambre et le verre, préalablement frottés avec de la laine, attirent les barbes de plume et autres corps légers.

Il en est d'autres, au contraire, qui déterminent des altérations profondes et durables dans les propriétés des corps : on les appelle *phénomènes chimiques*. Si, par exemple, on chauffe fortement un bâton de craie, ce n'est plus une dilatation passagère qu'on observera, comme dans le cas d'une tige métallique; le corps qui restera, après le refroidissement, n'aura plus du corps primitif que l'aspect extérieur; il aura perdu les propriétés de la craie et pris celles d'un nouveau corps, la chaux vive. De même, le fer, exposé à l'air humide, change d'aspect en se recouvrant d'un autre corps qu'on appelle rouille.

2. **Objet de la physique.** — Si l'on s'en rapportait à l'étymologie du nom, la *physique*[1] embrasserait l'étude de tous les phénomènes *naturels*. Mais cette science a restreint son objet, afin de le mieux étreindre et de l'approfondir davantage. Laissant aux diverses branches de l'*histoire naturelle* les phénomènes relatifs aux êtres organisés, animaux et végétaux, à l'*astronomie* les phénomènes célestes, à la *minéralogie* la classification et les propriétés des *corps bruts* ou *minéraux*, à la *géologie* l'histoire de la croûte terrestre et des phases successives de sa lente formation, à la *chimie* enfin les phénomènes chimiques, elle s'est exclusivement réservé l'étude approfondie des phénomènes physiques.

Ajoutons que la ligne de démarcation est beaucoup plus tranchée entre la physique et les sciences naturelles qu'entre la physique et la chimie. Ces deux sciences se touchent par bien des points, non seulement dans leur objet, mais dans leur méthode et dans leurs résultats généraux. C'est pourquoi on les comprend souvent sous le nom commun de *Sciences physiques*, par opposition aux *Sciences naturelles*, qui désignent toutes les autres sciences de la nature.

3. **Méthode physique** ou **méthode expérimentale. — Lois physiques.** — Une science se définit aussi bien par sa méthode que par son objet. La physique s'élève à la connaissance complète de son objet par trois degrés successifs qui sont les traits principaux

1. *Du grec* φύσις, *nature.*

de sa méthode : l'*observation*, l'*expérimentation* et la *généralisation*.

L'*observation* consiste à examiner avec soin un phénomène dans les circonstances ordinaires de sa production, et à déterminer avec précision ces circonstances, quelque complexes qu'elles soient.

L'*expérimentation* consiste à observer le même phénomène dans des conditions spéciales de simplicité, préparées à l'avance, de manière à isoler successivement chacune des circonstances qui l'accompagnent ordinairement en bloc.

L'expérimentation est le trait véritablement distinctif de la *méthode physique*, que l'on désigne souvent aussi sous le nom de *méthode expérimentale*.

La *généralisation* consiste à exprimer par un énoncé général et unique l'ensemble des résultats acquis par l'expérimentation. Cet énoncé général constitue la *loi physique*.

Un seul exemple suffira pour nous montrer la marche de la science.

L'observation la plus vulgaire nous révèle l'existence du phénomène de la chute des corps. Une pierre, ou tout autre corps, se précipite vers le sol dès qu'on ne la soutient plus : donc tous les corps tombent. Rien de plus facile à constater avec précision. Mais comment les corps tombent-ils? Leur mouvement est-il également rapide à toutes les époques de leur chute? Si la rapidité de chute n'est pas constante, comment varie-t-elle avec les hauteurs parcourues? Tout autre corps pesant, abandonné à lui-même dans les mêmes conditions que la pierre, prendrait-il le même mouvement? L'air atmosphérique, traversé par le corps tombant, ne s'oppose-t-il pas à sa chute? ne le retarde-t-il pas, et dans quelle proportion? Toutes ces particularités, essentielles à connaître pour savoir précisément *comment les corps tombent*, ne peuvent être découvertes que par l'expérience : par exemple, on portera successivement le corps pesant à des hauteurs de plus en plus grandes, et l'on mesurera les durées de ses chutes successives; ou bien on le fera tomber dans un tube vide d'air, de manière à supprimer la résistance de l'atmosphère.

On arrivera ainsi à une connaissance absolue du phénomène, qui permettra d'en prédire tous les détails pour un cas quelconque, donné *à priori*. L'expression générale des relations qui existent entre ce phénomène et ces diverses circonstances constitue la *loi de la chute des corps*, découverte par Galilée et dont voici l'énoncé :

Les espaces parcourus par un corps qui tombe librement dans

le vide sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.

4. **Théories physiques. — Anciens fluides impondérables. — Anciens agents physiques. — Physique moderne.** — On peut arriver, en imaginant certaines hypothèses convenablement choisies, à relier entre elles les différentes lois physiques qui se rapportent à une même classe de phénomènes, de telle manière qu'on puisse ensuite les déduire les unes des autres, par le raisonnement ou le calcul, et même prévoir de nouvelles lois, susceptibles elles-mêmes d'une vérification expérimentale : on a alors constitué la *théorie physique*[1] de cette classe de phénomènes.

Une théorie physique est essentiellement provisoire. Elle doit être modifiée dès que l'expérience vient à contredire les conséquences qu'on en peut tirer. L'histoire de la physique abonde en exemples de ces contradictions. Car la conception des théories et leur adoption, souvent prématurée, sont des besoins innés de l'esprit humain.

Les premiers essais d'explication des phénomènes naturels se trouvent dans les mythologies et les livres sacrés des anciens peuples. Ce sont les prêtres et les fondateurs de religions qui furent les premiers physiciens des sociétés naissantes, comme ils en furent les premiers législateurs. Ils ne firent pas d'ailleurs de grands efforts d'attention pour observer les faits, ni de raisonnement pour les expliquer : c'est de leur imagination qu'ils tirèrent presque toute leur science. A chaque effet naturel constaté ils attribuaient une cause surnaturelle : ils inventaient une divinité spécialement chargée de le produire. C'est ainsi que furent créés par les hommes les innombrables dieux du paganisme, dieux du feu, de la lumière et des ténèbres, du soleil et de la lune, de la mer, des fleuves et des rivières, des vents et des saisons, de la pluie et du beau temps.

Cet instinct du merveilleux et du surnaturel se perpétua à travers l'antiquité païenne jusqu'au moyen âge. Il prit alors une forme nouvelle, et il provoqua les pratiques occultes des alchimistes, leurs formules cabalistiques et leurs bizarres conceptions sur la constitution des corps. On peut en suivre l'influence, malgré les progrès de la méthode expérimentale, jusque dans les temps modernes, et en signaler la dernière manifestation dans

1. Toutefois cette dénomination s'applique aussi quelquefois, mais improprement, à l'explication de certains phénomènes particuliers dans lesquels n'intervient *aucune hypothèse à priori* : on dit, par exemple, la *théorie de la rosée*, *la théorie de l'arc-en-ciel*, etc.

cette habitude d'explications *à priori* qui a prévalu jusqu'aux premières années de ce siècle, et qui a produit le *phlogistique* des anciens chimistes et les *fluides impondérables* ou *agents physiques* des anciens physiciens. On attribuait la cause des différents phénomènes, non plus à des personnes, mais à des entités particulières, qu'on supposait dénuées de poids et qu'on appelait *fluides impondérables*. On imagina ainsi le *fluide lumineux*, le *calorique* ou *fluide calorifique*, les *électricités résineuse* et *vitrée* ou *fluides électriques positif* et *négatif*, les deux *magnétismes* ou *fluides magnétiques*, *boréal* et *austral*

Mais, de même que les progrès de la raison humaine avaient fait disparaître les êtres qui réglaient à volonté l'apparition des phénomènes naturels, de même le développement des sciences expérimentales a montré l'inutilité de tous ces fluides hypothétiques pour expliquer les lois si variées de la nature. On admet aujourd'hui l'existence de mouvements moléculaires, qui nous échappent individuellement par suite de leur extrême petitesse, mais qui affectent nos sens d'une autre manière, par suite de leur grand nombre et de leur accumulation. Transmis par l'*éther*, milieu hypothétique, qui remplit l'espace et pénètre intimement tous les corps, ils nous font éprouver, suivant leur amplitude ou leur vitesse, la sensation de *chaleur* ou la sensation de *lumière*. Ce sont eux également qui produisent vraisemblablement — et par un mécanisme que les électriciens élucident de jour en jour — les phénomènes si curieux et si variés de l'*Électricité* et du *Magnétisme*. C'est encore à ces mouvements moléculaires qu'on rattache aujourd'hui les attractions qui paraissent s'exercer entre tous les corps, soit aux distances extrêmement petites des molécules, sous le nom de *Forces moléculaires*, soit aux distances extrêmement grandes des astres, sous le nom de *Pesanteur* et de *Gravitation universelle*.

5. **Divisions de l'ouvrage.** — Le déplacement des corps les uns par rapport aux autres, c'est-à-dire le *mouvement*, étant le plus simple des phénomènes physiques, l'enseignement de la Physique doit débuter par la science abstraite du mouvement, c'est-à-dire par la *Mécanique*. Nous n'exposerons ici que les notions fondamentales de cette science moderne, en renvoyant pour les détails à un ouvrage spécial où nous les avons exposées avec tous les développements nécessaires[1].

Conformément à l'esprit de la Physique moderne, nous appli-

1. *Traité de Mécanique expérimentale et pratique*, par MM. Maneuvrier et Berget (librairie Hachette).

querons tout d'abord les principes de la Mécanique à l'étude du mouvement des corps pesants (*Pesanteur*) et à celle de l'équilibre des liquides (*Hydrostatique*) et de l'équilibre des gaz (*Pneumatique*). L'*Acoustique*, ou Science du son, nous fournira ensuite un premier exemple très net de mouvements vibratoires de la matière qui engendrent des phénomènes physiques et des phénomènes physiologiques. L'étude de ces vibrations sonores, qu'on peut aisément rendre accessibles aux sens, nous conduira logiquement à l'étude des vibrations lumineuses (*Lumière*) et des vibrations calorifiques (*Chaleur*), qu'on ne peut ni voir, ni toucher individuellement et dont l'existence ne nous est démontrée que par le raisonnement. Nous exposerons ensuite les faits fondamentaux du *Magnétisme* et de l'*Électricité*, sciences nouvelles, ou plutôt renouvelées depuis peu, qu'on ne peut encore rattacher naturellement aux autres parties de la Physique que par la loi de la *Conservation de l'énergie*, principe fondamental de la Mécanique moderne.

En outre, après l'étude de la Pesanteur, qui nous aura familiarisés avec les phénomènes physiques, nous intercalerons l'exposé du *Système de mesures*, dites *absolues*, établi en 1881 par un Congrès international de physiciens, ainsi que la description des principaux instruments de mesure, dits *Instruments de précision*, employés en physique; nous introduirons la *Capillarité*, ou Science des phénomènes capillaires, après l'Hydrostatique, dont ils paraissent contredire les lois, et nous terminerons ce Traité par la *Météorologie*, Science des phénomènes atmosphériques, qui nécessite l'application des lois et des appareils de toutes les autres parties de la Physique.

CHAPITRE II

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DE LA MATIÈRE.

6. **États physiques des corps.** — La matière frappe nos sens tout d'abord par la diversité de ses aspects. Elle se manifeste à nous sous trois types distincts, qu'on appelle *états physiques* des corps. Ce sont l'*état solide*, l'*état liquide* et l'*état gazeux*.

A l'état solide, les corps ont une forme et un volume bien déterminés. Tels sont le bois, les pierres, les métaux. On les appelle *corps solides, ou simplement solides*. A l'état liquide, les corps ont

encore un volume déterminé, mais ils n'ont pas de forme propre : ils prennent celle du vase qui les renferme. L'eau est le plus connu de ces corps. On les appelle *corps liquides*, ou simplement *liquides*. A l'état gazeux, les corps n'ont plus ni forme ni volume propres; ils tendent constamment à occuper tout l'espace qui leur est ouvert : on les appelle *gaz*. Tel est l'air atmosphérique.

Dans les solides, les parties sont adhérentes les unes aux autres, et l'on ne peut les séparer qu'en développant un effort plus ou moins considérable. Ces corps offrent une résistance plus ou moins grande non seulement à la rupture, c'est-à-dire à la séparation complète de leurs parties, mais aussi aux simples déplacements de celles-ci, amenant des déformations permanentes ou transitoires : cette propriété caractéristique de l'état solide est appelée *cohésion*.

Les gaz se comportent d'une manière tout opposée. Comme si leurs parties se repoussaient mutuellement, on ne peut les contenir dans un espace limité qu'en y appliquant de l'extérieur un effort plus ou moins grand. Qu'on mette une vessie, dégonflée et fermée, dans un espace vide d'air (sous le récipient d'une machine pneumatique), on la verra se gonfler rapidement par suite de l'expansion de la faible quantité de gaz qui y restait. Cette propriété caractéristique de l'état gazeux est appelée *expansibilité*.

Enfin l'état liquide est un état intermédiaire entre les deux autres. Les particules liquides ne paraissent ni s'attirer comme les particules solides, ni se repousser comme les particules gazeuses; elles peuvent glisser aisément les unes sur les autres, de manière à pouvoir se mélanger sans effort et à changer de forme à volonté sans changer de volume. Cette mobilité des particules, résultant de l'absence de cohésion, est appelée *fluidité*. Cette propriété, commune aux liquides et aux gaz, leur a fait donner le nom commun de *fluides*[1].

Remarques. — 1° La différence d'états physiques est un effet de la température des corps. Une même substance, telle que l'eau, peut exister successivement à ces trois états. La plupart des corps y ont été déjà amenés, avec des difficultés plus ou moins grandes. On peut affirmer que tous les corps seront un jour préparés et maintenus, à volonté, à l'état de solides, de liquides ou de gaz.

2° Les trois états physiques ainsi définis sont, comme nous l'avons dit, des types distincts, mais qui sont reliés entre eux par une série continue de types intermédiaires. Ainsi les liquides visqueux, comme les *pâtes* et les *gelées*, passent graduellement de

1. Du latin *fluere*, couler.

l'état liquide à l'état solide. Nous verrons plus tard que les gaz, à un certain degré de compression, ne diffèrent pas sensiblement des liquides.

7. **Classification des propriétés de la matière.** — La plupart des propriétés qui nous révèlent, par l'intermédiaire des phénomènes, l'existence de la matière, sont *accidentelles* ou *particulières*. Celles qui définissent les états physiques, la ténacité, la fluidité, l'expansibilité, en sont un exemple; de même celles qui caractérisent telle ou telle substance, comme la transparence, la coloration, etc. Ces *propriétés particulières* ne peuvent donc nullement servir à caractériser l'essence même de la matière.

D'autres propriétés sont appelées *propriétés générales*, parce qu'elles sont communes à tous les corps. Ce sont la *compressibilité*, la *divisibilité* et la *porosité*. Mais on ne considère comme *propriétés essentielles* de la matière que l'*étendue* et l'*impénétrabilité*, qu'on peut rattacher elles-mêmes à une autre propriété essentielle, et seule primordiale, l'*inertie*.

8. **Inertie.** — On ne peut concevoir l'existence de la matière indépendamment de l'espace qui la contient. En même temps que nous percevons un corps, nous percevons aussi les corps environnants, ainsi que les rapports de distance qui existent entre eux. Suivant que ces rapports sont variables ou constants, le corps nous paraît être en *mouvement* ou en *repos*. Ces deux termes sont tellement clairs par eux-mêmes, que nous en obscurcirions le sens en essayant de les définir.

Or, tandis que les êtres animés se meuvent ou s'arrêtent par l'effet d'une volonté intérieure, on constate que *tous les corps matériels* sont dépourvus de spontanéité, soit pour se mouvoir, soit pour s'arrêter : on exprime ce fait général en disant que ces corps sont *inertes*. L'*inertie* est donc la *résistance* qu'opposent tous les corps soit *au mouvement*, soit *au changement de mouvement*.

Cette résistance est plus ou moins grande, suivant la *quantité de matière* que le corps contient sous un volume déterminé. L'inertie est donc une propriété susceptible de mesure. Nous la mesurerons plus tard et nous en définirons la mesure sous le nom de *masse*.

9. **Étendue. — Impénétrabilité.** — On appelle *étendue* la propriété qu'ont tous les corps d'occuper une portion de l'espace, *limitée* et *figurée*, c'est-à-dire douée d'un volume et d'une forme déterminés.

L'impénétrabilité des corps consiste en ce que deux portions *distinctes de matière ne* peuvent jamais s'identifier l'une avec

l'autre, de manière à *coexister* dans un même lieu de l'espace.

10. **Compressibilité** — C'est une propriété générale de la matière qu'on définit, conformément à l'étymologie du nom, la propriété qu'ont tous les corps *de pouvoir se réduire à un moindre volume par l'effet de la pression.*

La compressibilité est très variable d'un corps à un autre, et surtout d'un état physique à un autre. Elle est très grande pour tous les gaz, beaucoup moindre, et à des degrés divers, pour les solides, et presque nulle pour les liquides, qu'on a longtemps considérés comme des *fluides incompressibles.* Mais nous verrons plus loin qu'on a pu constater par l'expérience et mesurer avec précision la compressibilité des liquides.

Remarques. — 1° *Élasticité.* — A la compressibilité on doit rattacher l'*élasticité*, propriété que possèdent la plupart des corps comprimés, de reprendre leur forme et leur volume primitifs dès que la cause de compression a cessé d'agir.

2° *Dilatabilité.* — Le volume extérieur des corps est une grandeur qui varie non seulement avec la pression extérieure, mais encore avec la température. Lorsque la compressibilité résulte de la variation de température, et non de la variation de pression, on lui donne plutôt le nom de *dilatabilité.*

11. **Divisibilité.** — On appelle ainsi la propriété que possèdent tous les corps de pouvoir être divisés en particules *indéfiniment* petites, sans perdre pour cela aucune des propriétés caractéristiques de leur substance.

On peut opérer cette division sur les solides par un grand nombre de procédés que nous fournissent les arts mécaniques et les sciences physiques. Ainsi, l'on souffle des objets en verre de 1 *micron*[1] d'épaisseur; on étire des fils de platine de 0μ,8 de diamètre; on bat des feuilles d'or de 0μ,1 d'épaisseur; on recouvre des fils d'argent d'une couche d'or qui ne dépasse pas 0μ,004.

Les liquides volatils et certaines substances colorantes ou odorantes nous offrent des exemples non moins étonnants de divisibilité. On a calculé que le diamètre moyen des *globules d'eau* qui constituent les nuages prêts à se résoudre en pluie varie de 23 μ à 56 μ : de sorte que le nombre de ces globules que contient une goutte d'eau de 1 millimètre de diamètre varie entre 5 000 et 50 000. Un cent-millième de centimètre cube de *rosaniline* suffit pour colorer sensiblement 1 litre d'alcool. 5 centigrammes de *musc* suffisent pour répandre une odeur sensible pendant plusieurs

1. On désigne *habituellement par micron le millionième du mètre*, ou le *millième de millimètre; on le représente par la lettre* μ.

années dans un appartement où l'air est fréquemment renouvelé.

Tous ces exemples de division sont peu de chose à côté de ceux que la nature nous fournit par milliers dans le monde microscopique des cellules organisées et des infusoires. La goutte de sang humain qui peut être suspendue à la pointe d'une aiguille contient plus d'un *million* de globules rouges sphériques. Si l'on regarde au microscope une gouttelette d'eau corrompue, ou de bouillon fermenté, ou de vinaigre altéré, on voit une multitude d'animalcules s'y mouvoir en tous sens, avec une extrême vivacité.

12. **Atomes et molécules.** — Tous ces exemples prouvent que la divisibilité de la matière est *indéfinie*, puisqu'elle peut être réalisée jusqu'à un degré où les particules échappent à la perception de nos sens; mais est-elle pour cela *infinie*, c'est-à-dire peut-elle être poussée au delà de toute limite?

Si l'on veut parler d'une divisibilité *abstraite* et *géométrique*, il n'y a aucun doute qu'elle ne soit illimitée. En effet, quelque petite qu'on suppose une parcelle de matière, on pourra toujours la *supposer* divisée en deux moitiés, puis chacune de ces moitiés divisée en deux autres, et ainsi de suite jusqu'à l'infini. Mais s'il s'agit d'une divisibilité *réelle* et *physique*, nous ne pouvons rien prononcer d'absolu, puisque aucun des procédés dont nous disposons actuellement ne nous permet de pousser l'expérience au delà d'un certain degré de division, assigné par le degré d'acuité de nos sens et le degré de précision de nos instruments de mesure.

On admet, dans la science actuelle, que la divisibilité de la matière *n'est pas infinie*. En supposant qu'on employât des procédés de division beaucoup plus parfaits que ceux dont on dispose aujourd'hui, on serait arrêté à une limite infranchissable, l'*atome*, qu'on peut concevoir comme un volume de figure déterminée, que l'action des forces naturelles est impuissante à diviser ou à altérer.

On appelle *molécule* un groupe d'atomes qui représente la plus petite parcelle d'une substance chimiquement définie qui puisse exister à l'état individuel et isolé.

Les molécules seules sont quelque chose de semblable aux corps, elles en partagent les propriétés et elles n'en diffèrent que par les dimensions. Par les rapports de position qu'elles ont entre elles, les molécules déterminent ce que nous appelons le *volume* et la *forme* des corps, tandis que les rapports de position qu'ont entre eux les atomes dont elles sont formées différencient ces *mêmes corps* au point de vue de la *substance*, au point de vue des *propriétés chimiques*.

D'ailleurs la molécule pas plus que l'atome n'est perceptible à nos sens ou à nos instruments de mesure.

13. **Pores moléculaires. — Porosité et Perméabilité.** — On doit admettre que les corps les plus durs, les plus tenaces, les plus compacts ne sont pas formés de matière absolument continue; car, si cette continuité existait, il serait impossible d'expliquer un grand nombre de faits qui semblent en contradiction avec l'impénétrabilité de la matière. Comment le même corps pourrait-il se contracter ou se dilater par la variation de pression ou de température? Comment les sels pourraient-ils se dissoudre dans l'eau, le mercure s'insinuer dans la masse de certains métaux? Comment ces dissolutions, ces mélanges, pourraient-ils s'opérer sans augmentation apparente du volume total, et même parfois avec une contraction apparente (54 volumes d'alcool et 50 volumes d'eau ne donnent que 100 volumes de mélange)? Il faut donc admettre que les molécules ne sont pas *juxtaposées* dans les corps, mais qu'elles sont séparées entre elles par des intervalles appréciables, susceptibles d'augmenter ou de diminuer sous l'influence de causes extérieures.

Ce sont ces intervalles qu'on a appelés *pores moléculaires*. Ils sont du même ordre de petitesse que les molécules elles-mêmes.

Les pores moléculaires, de même que les molécules, échappent donc absolument à l'appréciation de nos sens.

Remarque. — Il ne faut pas confondre les pores moléculaires avec les lacunes naturelles ou accidentelles que présentent certains corps, vulgairement appelés *poreux*, tels que les éponges, la pierre ponce, etc. Ces interstices physiques sont souvent visibles à l'œil nu ou au microscope. L'existence de ces lacunes constitue la *perméabilité* des corps, tandis que celle des pores proprement dits constitue la *porosité*.

CHAPITRE III

NOTIONS DE MÉCANIQUE

DÉFINITIONS FONDAMENTALES ET PRINCIPES GÉNÉRAUX.

14. Objet de la Mécanique. — La *Mécanique* a pour objet l'étude du mouvement *en lui-même et dans ses* origines, ainsi que *dans ses conséquences et ses applications.*

C'est donc dans la nature, et non dans l'imagination, qu'il faut chercher les principes et les lois fondamentales de la mécanique; c'est par l'observation, aidée de l'induction, et non par le raisonnement seul, qu'on a pu les découvrir. Mais, ces principes et ces lois une fois posés, toute la science s'en déduit par l'application rigoureuse de la méthode géométrique. C'est donc à juste titre qu'on considère la mécanique comme une branche des sciences mathématiques : on lui donne le nom de *Mécanique rationnelle*, pour la distinguer de la *Mécanique céleste* et de la *Mécanique appliquée* ou *Mécanique industrielle*, qui sont des applications de la science pure soit au mouvement des astres, soit au fonctionnement des machines. C'est de cette dernière application qu'on a tiré le nom de la science tout entière[1].

Nous nous contenterons de donner ici les définitions fondamentales et de rappeler les principes qui sont nécessaires à l'intelligence et à l'interprétation des phénomènes physiques proprement dits. Nous renverrons nos lecteurs aux traités spéciaux pour tous les développements.

15. **Divisions de la Mécanique rationnelle.** — La Mécanique rationnelle se subdivise ordinairement en trois parties : la *Cinématique*, la *Statique* et la *Dynamique*.

Dans la *Cinématique*[2], on étudie tout d'abord le mouvement *en soi*, à un point de vue purement abstrait et géométrique, sans se préoccuper des forces qui le produisent. La Cinématique est donc une sorte de géométrie du mouvement, qui joint à l'*idée d'espace*, seule base de la géométrie, l'*idée de temps*, corrélative de la notion de mouvement. Les autres parties de la Mécanique rationnelle comprennent l'étude des forces ou causes du mouvement, que l'on considère successivement à l'état d'équilibre (*Statique*, de στατική, équilibre), puis à l'état d'action (*Dynamique*, de δύναμις, puissance).

CINÉMATIQUE.

16. **Définitions préliminaires.** — *Vitesse.* — La notion de mouvement, qui implique celles d'espace et de temps, s'acquiert par la vue d'un objet quelconque qui se déplace, par exemple un corps pesant qui tombe, un projectile qui traverse l'atmosphère, un

1. *Du grec* μηχανή, *machine.*
2. *Du mot* κίνημα, *mouvement.*

train de chemin de fer qui passe. On acquiert du même coup la notion de *vitesse*, qui comprend celle d'une vitesse *plus ou moins grande*, d'une *vitesse constante* et d'une *vitesse variable*. On observe ces divers cas de vitesse dans les allures successives que prend un train, au départ d'une station, ou bien à l'arrivée, ou bien, à une certaine distance, dans l'intervalle de deux stations.

Mobile. — On appelle *mobile* tout corps qui est en mouvement.

Point matériel. — Une seule propriété des corps intervient dans l'étude de leur mouvement : c'est l'inertie. Il est commode de supprimer par la pensée toutes les autres, même l'étendue. On ne considère donc que des mobiles sans étendue, c'est-à-dire réduits aux dimensions d'un point géométrique, n'ayant d'autre propriété que d'être *inertes*, c'est-à-dire de résister au mouvement, à des degrés divers, caractérisés par leurs masses : c'est ce qu'on appelle des *points matériels*. Les résultats trouvés pour un point matériel unique pourront être étendus à un mobile de dimensions finies, car on peut considérer un corps quelconque comme un système de points matériels.

Trajectoire. — Le lieu des points géométriques que le mobile occupe successivement dans l'espace s'appelle sa *trajectoire*.

Le mobile étant un point géométrique, sa trajectoire est une ligne géométrique. Suivant que cette ligne est droite ou courbe, on dit que le mouvement est *rectiligne* ou *curviligne*.

17. **Mouvement uniforme.** — 1° *Définition.* — On appelle *mouvement uniforme* celui dans lequel un mobile parcourt des espaces égaux dans des temps égaux, quelque petits que soient ces temps. Le mot *espace* prend ici le sens restreint de *chemin parcouru sur la trajectoire*, ou de *portion de trajectoire*.

Suivant que la trajectoire est rectiligne ou curviligne (fig. 1), le mouvement uniforme est lui-même un *mouvement rectiligne* ou *curviligne*.

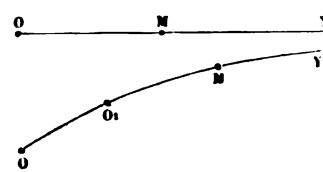


Fig. 1.

Ce mouvement est le plus simple qu'on puisse imaginer, mais il est le plus difficile à réaliser dans la pratique et le plus rare dans la nature.

2° *Vitesse.* — On mesure la *vitesse* par l'espace parcouru pendant l'unité de temps. Si l'on prend, comme d'habitude, le mètre pour unité de longueur et la seconde pour unité de temps, on exprimera *la vitesse en mètres par seconde*. On dira, par *exemple, que la Terre tourne sur elle-même* (mouvement diurne)

avec une vitesse *de 463 mètres par seconde* (pour un point de l'équateur); ou bien l'on dira que *la vitesse du mouvement curviligne uniforme* d'un point de l'équateur terrestre *est de 463 mètres par seconde.*

On peut encore dire que, dans le mouvement uniforme, *la vitesse est le rapport de l'espace parcouru au temps employé à le parcourir*, ou bien *le rapport de l'accroissement de l'espace à l'accroissement du temps.* On la représente par la formule $v = \frac{e}{t}$, e étant l'espace parcouru et t le temps.

18. **Mouvement varié.** — 1° *Définition.* — Le *mouvement varié* est celui dans lequel un mobile parcourt en des temps égaux des espaces inégaux. Le mouvement varié peut être *rectiligne* ou *curviligne.*

Un pareil mouvement peut être varié d'une infinité de manières. Il est défini dans chaque cas par la trajectoire du mobile et par l'*équation des espaces*, c'est-à-dire par la relation numérique qui existe entre l'*espace* parcouru par le mobile sur sa trajectoire et le *temps* employé à le parcourir.

2° *Vitesse moyenne pendant un intervalle de temps donné* (*Mouvement rectiligne*). — Soit OX la trajectoire du mobile (fig. 2), M sa position au temps t et M' sa position au temps $t + \Delta t$. (Nous désignerons, suivant l'usage algébrique, par Δe l'accroissement MM' de l'espace, et par Δt l'accroissement du temps.) On pourrait évidemment amener le mobile de la première position à la deuxième, dans le même temps Δt, en lui imprimant un mouvement rectiligne *uniforme.* La vitesse de ce mouvement virtuel serait donnée par l'équation

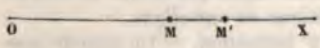


Fig. 2.

$$V_m = \frac{\Delta e}{\Delta t},$$

et elle s'exprimerait en mètres par seconde. Ce rapport $\frac{\Delta e}{\Delta t}$ est ce qu'on appelle la *vitesse moyenne* du mouvement varié *pendant l'intervalle de temps Δt qui succède à l'instant* t.

Remarquons que cette vitesse V_m dépend à la fois de l'intervalle de temps Δt et de l'époque t à partir de laquelle on le compte [1].

1. *Voir les définitions relatives* au mouvement curviligne : *Mécanique* de Maneuvrier et Bergot.

3° *Vitesse à un instant* t *quelconque* (*Mouvement rectiligne*). — Si l'on suppose que l'intervalle de temps Δt diminue indéfiniment et tende vers zéro, l'accroissement d'espace MM' (fig. 2) tend simultanément vers zéro; mais le rapport $\frac{\Delta e}{\Delta t}$, c'est-à-dire la vitesse moyenne, tend généralement vers une limite déterminée; c'est la valeur de cette limite qu'on appelle *vitesse* du mouvement varié *à l'instant* t. On a donc

$$V_t = \lim. \left(\frac{\Delta e}{\Delta t}\right).$$

Cette vitesse s'exprime encore en *mètres par seconde*, comme dans le mouvement uniforme; mais il est sous-entendu qu'elle ne désigne pas le trajet fait réellement par le mobile en 1 seconde, mais *celui qu'il ferait* s'il continuait à marcher, à partir de l'instant *t*, *avec une vitesse demeurant constante* et égale à V_t [1].

19. **Mouvement rectiligne uniformément varié.** — 1° *Définition.* — Le plus simple des mouvements variés, et en même temps le plus intéressant dans la pratique, est le *mouvement rectiligne uniformément varié*. On dit qu'un mouvement rectiligne est uniformément varié, lorsque la vitesse *croît* ou *décroît* de quantités égales dans des temps égaux, quelque petits qu'ils soient.

Dans le premier cas, le mouvement est *uniformément accéléré* : tel est celui d'un corps qui tombe, abstraction faite de la résistance de l'air. Dans le second, il est *uniformément retardé* : tel est le mouvement d'une pierre lancée verticalement de bas en haut.

La quantité, positive ou négative, dont la vitesse varie dans l'unité de temps, s'appelle *accélération*.

2° *Vitesse.* — On doit la définir de la même manière que dans un mouvement varié quelconque : c'est la limite de $\left(\frac{\Delta e}{\Delta t}\right)$ quand Δt tend vers zéro.

3° *Lois du mouvement uniformément accéléré.* — On énonce les équations du mouvement sous le nom de *lois du mouvement uniformément accéléré*.

I. Loi des vitesses. — *Les vitesses croissent proportionnellement aux temps.* C'est-à-dire qu'après un temps double, triple, quadruple, la vitesse est 2, 3, 4 fois plus grande.

II. Loi des espaces. — *Les espaces parcourus sont proportionnels*

1. *Voir Mécanique de Maneuvrier et Bergot.*

aux carrés des temps employés à les parcourir. C'est-à-dire que, si l'on représente par 1 le chemin parcouru en 1 seconde, les chemins parcourus en 2, 3, 4, 5.... secondes seront représentés par 4, 9, 16, 25....

4° Nous verrons dans la chute des corps un exemple de mouvement uniformément accéléré caractérisé par ces lois.

20. **Mouvement absolu, mouvement relatif, mouvement apparent.** — Jusqu'à présent nous avons supposé que le mobile se déplaçait par rapport à un point fixe, l'*origine des espaces*, sur une trajectoire, droite ou courbe, dont tous les points étaient également fixes. Nous nous étions placés dans le cas du *mouvement absolu*, cas idéal, introuvable dans la nature, irréalisable dans la pratique. Cette hypothèse n'infirme d'ailleurs nullement les résultats que nous avons trouvés; car, tant qu'on ne considère que les déplacements d'un point matériel par rapport à des repères donnés, il importe peu que ces repères soient réellement fixes dans l'espace : il suffit qu'ils le soient par rapport au mobile considéré.

Le cas ordinaire est celui où les points de repère ainsi que tous les points de la trajectoire du mobile sont emportés eux-mêmes d'un mouvement commun quelconque, qu'on appelle *mouvement d'entraînement*. Le mouvement que le mobile possède alors dans son propre système est un *mouvement relatif*. Tel est, par exemple, le mouvement des billes d'un billard qui serait installé dans un bateau en marche. Tel est le mouvement du bateau lui-même par rapport aux rives d'un fleuve; car celles-ci participent avec lui au double mouvement de la Terre qui tourne sur elle-même tout en se déplaçant sur son orbite autour du Soleil. Tels sont enfin tous les mouvements que nous observons soit autour de nous, à la surface de la Terre, soit au-dessus de nous, dans les espaces célestes.

En résumé, lorsqu'un mobile M se meut dans un système A, fixe ou supposé fixe, ce mobile a un *mouvement absolu*; mais quand le système A se déplace lui-même par rapport à un autre système B, supposé fixe, le mobile M a un mouvement *relatif* dans le système A et *absolu* dans le système B.

On confond souvent les expressions *mouvement relatif* et *mouvement apparent*, qui ne sont pourtant pas identiques. Le mouvement *apparent* du mobile M peut être, suivant la situation de l'observateur qui considère le mouvement, soit son mouvement relatif dans le système A, soit son mouvement absolu dans le système B. Si l'observateur fait partie du système A, le mouvement qu'il perçoit, qui est *apparent pour lui*, c'est le mouvement relatif de M *dans A; si l'observateur* fait partie du système B, le seul mouve-

ment qui soit *apparent pour lui*, c'est le mouvement absolu de M dans B.

21. **Composition des mouvements.** — La considération du mouvement relatif et du mouvement absolu conduit au problème général suivant :

Un mobile M *est animé d'un mouvement relatif dans le système* A ; *ce système* A *est animé lui-même d'un mouvement d'entraînement dans le système* B : *connaissant ces deux mouvements, trouver le mouvement absolu du mobile* M *dans le système* B.

C'est ce qu'on appelle le *problème de la composition des mouvements*, parce qu'on peut considérer le mouvement de M dans B comme un mouvement *composé* ou *résultant* des deux autres mouvements, lesquels en sont eux-mêmes les *mouvements composants*.

Ce problème a pour complément un problème inverse, celui de la *décomposition* des mouvements. On peut l'énoncer aussi, d'une manière abrégée :

Étant donné le mouvement résultant et l'un des mouvements composants, trouver l'autre mouvement composant.

La cinématique a pour objet la résolution de ces deux problèmes, soit dans le cas général où le mouvement d'entraînement du système A est un mouvement quelconque, soit dans le cas le plus ordinaire où ce mouvement d'entraînement est un mouvement de *translation*[1].

STATIQUE.

22. **Forces. — Équilibre. — Statique.** — On appelle *force* toute cause capable de produire le mouvement ou de le modifier. L'action des muscles chez les animaux, la pesanteur, les attractions et les répulsions magnétiques ou électriques sont des forces. Nous ignorons en quoi consistent les forces, mais la notion nous en est donnée nettement par la sensation de l'effort. Cette notion de force implique trois éléments qui la caractérisent, à savoir le *point d'application* de la force, sa *direction* et son *intensité*.

Plusieurs forces étant appliquées à un même corps, il peut arriver qu'elles se neutralisent mutuellement et que l'état de

1. On dit qu'un système A est animé d'un mouvement de *translation*, lorsque tous ses points décrivent, dans le même temps, des droites égales et parallèles. Un mouvement de translation peut être uniforme ou varié. (Voir la composition des mouvements dans la *Mécanique Maneuvrier et Berget.*)

repos ou de mouvement du corps ne soit pas modifié. On dit alors que *le corps est en équilibre* et que les forces appliquées au corps *se font équilibre*.

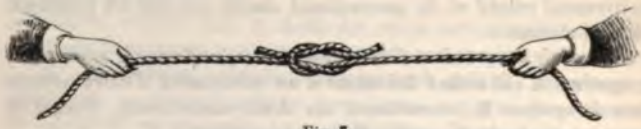


Fig. 3.

On appelle *Statique* la partie de la mécanique qui traite des forces considérées à l'état d'équilibre et qui détermine les conditions de cet équilibre.

23. **Mesure des forces. — Dynamomètres.** — On dit que deux forces sont *égales*, quand, appliquées en sens contraire à un même point matériel (fig. 3), elles se font équilibre. On dit qu'une force est *double*, *triple* d'une autre, lorsqu'elle fait équilibre à deux, trois forces, égales à celle-ci, et appliquées simultanément en sens contraire au même point matériel.

L'état d'équilibre fournit le moyen de *comparer* l'intensité d'une force à l'intensité d'une autre force, prise comme unité, c'est-à-dire de *mesurer* les forces. L'unité ordinairement adoptée, d'après le système métrique, est le *kilogramme*. *Théoriquement*, c'est la force avec laquelle une masse d'eau pure, à la température de 4°, du volume de 1 litre, est sollicitée par la pesanteur. *Pratiquement*, c'est la force avec laquelle la pesanteur sollicite une masse en platine, construite de manière à réaliser le kilogramme théorique, et conservée aux Archives sous le nom de *kilogramme-étalon*.

La comparaison des forces avec l'unité se fait au moyen d'instruments spéciaux appelés *dynamomètres*. Ils se composent tous essentiellement d'un ressort, dont l'élasticité peut faire équilibre à des forces variables. En appliquant successivement au ressort des poids connus, et en notant les flexions correspondantes, on graduera l'instrument en kilogrammes. Une force inconnue quelconque, appliquée ensuite au ressort et produisant *la même flexion* qu'un poids de n kilogrammes, vaudra elle-même, par définition, n kilogrammes.

Remarque. — Si la force conserve toujours la même intensité de n kilogrammes, on dit que c'est une *force constante*; si son intensité augmente ou diminue avec le temps, on dit que c'est une *force variable en grandeur*; si elle change de direction en *même temps que d'intensité*, on dit qu'elle est *variable en grandeur et en direction*.

24. Dynamomètres usuels. — 1° *Peson.* — L'un des plus simples parmi les dynamomètres usuels est le *peson*, fondé sur la force d'élasticité que développe la pression dans un ressort d'acier.

Description. — Il consiste en une lame d'acier trempé AB (fig. 4), recourbée en forme de V. A l'extrémité de la branche B est fixé un arc de fer *n*, qui se prolonge et passe librement dans une ouverture pratiquée à l'extrémité de la

Fig. 4.

Fig. 5.

branche A. A celle-ci est fixé un arc semblable *m*, s'engageant de même dans la branche B. Les arcs *m* et *n* se terminent, le premier par un crochet, le second par un anneau, et sur l'arc *n* est une échelle graduée qu'on obtient de la manière suivante.

Graduation. — Ayant fixé l'appareil à un support résistant, on suspend successivement au crochet des poids de 1, 2, 3, 4, 5.... kilogrammes. La branche B, maintenue par l'arc *n*, reste fixe, tandis que la branche A, entraînée par la charge que porte l'arc *m*, s'abaisse de plus en plus. On continue ainsi jusqu'à la limite de flexion que peut prendre la lame AB sans se rompre, en ayant soin, à chaque charge nouvelle, de marquer un trait sur l'arc *n*, au point où s'arrête la branche A; on inscrit enfin, de 5 en 5, les nombres 0, 5, 10, 15, 20..., et l'instrument est gradué.

Fig. 6.

Usage. — Pour appliquer le peson à la mesure des forces, pour apprécier, par exemple, l'effort nécessaire pour traîner un fardeau (fig. 5), on fixe le crochet de l'arc *m* à ce fardeau; puis, prenant à la main l'anneau de l'arc *n*, on tire jusqu'à ce que le mouvement se produise. La flexion de la branche A marque alors sur l'arc *n*, en kilogrammes, la valeur de l'effort de traction.

2° *Dynamomètre de Poncelet.* — Un autre dynamomètre fréquemment employé est celui de Poncelet (fig. 6). Il est formé de deux ressorts métalliques encastrés à leurs extrémités par deux lames courtes et rigides. Au repos, les deux branches de l'instrument sont rectilignes et parallèles (traits ponctués, fig. 6). Si l'on applique d'une part un effort et d'autre part des poids marqués aux crochets dont les ressorts sont munis, les deux branches fléchissent et se courbent en sens contraire jusqu'à ce que l'équilibre soit établi entre l'effort et la résistance.

25. **Représentation des forces.** — Une force est complètement déterminée lorsqu'on connaît son point d'application, sa direction et son intensité. On peut représenter ces divers éléments d'une force, comme on a représenté, en cinématique, les vitesses et les accélérations. On mène par son point d'application, dans le sens de sa direction, une ligne droite indéfinie; puis sur cette ligne, à partir du point d'application, et dans le sens où agit la force, on porte une unité de longueur arbitraire, le centimètre par exemple, autant de fois que la force donnée contient l'unité de force. On a ainsi une ligne droite qui représente complètement la force. Pour distinguer les forces entre elles, on les désigne par les lettres P, Q, R..., qu'on place sur leurs directions respectives à l'extrémité de la longueur qui en représente l'intensité (fig. 7).

Remarque. — Ce procédé de figuration graphique permet d'appliquer à l'étude des forces les mêmes méthodes géométriques qu'à l'étude des mouvements. La statique est donc, comme la cinématique, une sorte de géométrie, qui joint à l'idée d'espace, non seulement l'idée de temps, mais aussi l'idée nouvelle de force. Étant donné ces notions fondamentales et les principes d'observation qu'elles comportent, la statique procède géométriquement, comme la cinématique, et arrive de déductions en déductions à l'établissement des conditions d'équilibre d'un système de forces quelconques appliquées à un système de points matériels.

Fig. 7.

26. **Résultante et composantes.** — Lorsque plusieurs forces P, Q, R..., appliquées à un même point matériel A (fig. 7), se font équilibre, *il est évident que* l'une quelconque d'entre elles, R par exemple, peut, à elle seule, annuler l'action de toutes les autres. Une force S, égale et opposée à R, produirait donc à elle seule le même effet que le système des forces P et Q. *Toute force qui peut* ainsi produire le même effet que plusieurs *forces simultanées se nomme* leur *résultante*, et les autres forces,

par rapport à la résultante, en sont les *composantes*. La force S est la résultante des forces P et Q, et celles-ci en sont les composantes.

Le problème de la *composition des forces* consiste à trouver la résultante d'un système de forces quelconques. Le problème inverse de la *décomposition des forces* consiste à trouver un système de forces qui produise le même effet qu'une force unique donnée. On suppose toujours ces forces appliquées soit à un point matériel unique, soit à un système de points matériels séparés par des intervalles invariables, et constituant des *corps solides* absolument *rigides*, c'est-à-dire incompressibles et indéformables.

Le premier problème qui se présente en statique est celui de la *composition* et de la *décomposition* des forces. La solution de ce problème est indispensable à connaître pour résoudre toutes les questions d'équilibre [1].

DYNAMIQUE

27. **Définitions.** — La *Dynamique* (de δύναμις, puissance, force) est la partie de la mécanique où l'on étudie les forces, non plus *à l'état statique*, c'est-à-dire se faisant équilibre sur un système matériel, mais *à l'état dynamique*, c'est-à-dire produisant le mouvement.

L'objet de la Dynamique est de résoudre le double problème suivant :

1° Étant donné les forces qui agissent sur un corps, déterminer le mouvement de ce corps.

2° Étant donné le mouvement d'un corps, déterminer les forces qui agissent actuellement sur ce corps.

La dynamique est fondée sur trois principes généraux, sortes de *postulats*, qu'on a tirés, par induction, de l'observation de certains faits naturels et qu'on vérifie par l'expérience dans leurs conséquences pratiques. Ce sont :

1° Le *principe de l'inertie*, dont la première idée est due à Képler ;

2° Le *principe du mouvement relatif*, énoncé par Galilée ;

3° Le *principe de l'égalité de l'action et de la réaction*, découvert par Newton.

28. **Principe de l'inertie.** — 1° *Un corps ne peut rien changer de lui-même à son état de repos ni à son état de mouvement.*

1. Voir cette question dans la *Mécanique* Maneuvrier et Berget.

2° *Si un corps libre n'est sollicité parnea ucu force, ce corps est en repos ou bien il est animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme.*

La première proposition est le seul énoncé qu'on donne souvent du principe de l'inertie. Cependant elle ne constitue pas, à proprement parler, un principe; elle ne fait qu'exprimer, sous une forme nouvelle, l'existence de cette propriété essentielle de la matière que nous avons déjà définie sous le nom d'*inertie*. La seconde partie de l'énoncé, au contraire, est un véritable postulat. Rien ne pouvait faire deviner *à priori* que le *mouvement naturel* des corps est le mouvement rectiligne et uniforme; on a même longtemps cru que c'était le mouvement circulaire et uniforme. Mais le seul fait d'une bille, lancée sur un sol horizontal bien uni, qui se meut sensiblement en ligne droite avec une vitesse, non pas constante, mais lentement décroissante (à cause du frottement), a suffi pour indiquer ce principe; on l'a ensuite généralisé par induction, puis vérifié expérimentalement dans ses conséquences.

29. **Principe du mouvement relatif.** — *Dans un système de points matériels animés d'un mouvement de translation, toute force qui agit sur l'un d'eux lui imprime le même déplacement par rapport aux autres que si le système était en repos.*

Ce principe n'est indiqué nettement par l'observation que dans le cas où le mouvement de translation est rectiligne et uniforme, comme celui d'un bateau descendant paisiblement une rivière: mais on est amené, par les conséquences qu'on en déduit, à l'admettre aussi dans le cas général d'un système animé d'un mouvement de translation quelconque.

Conséquence : définition expérimentale de la vitesse à l'instant t *dans un mouvement varié* — Il résulte des deux principes précédents le corollaire suivant : *Si un corps libre est sollicité par une force quelconque, il prend un mouvement varié; et si, à un instant* t, *on vient à supprimer la force, le corps continue à se mouvoir d'un mouvement rectiligne et uniforme : la vitesse de ce dernier mouvement est précisément la vitesse à l'instant* t *du mouvement varié, et sa direction est celle de la tangente à la trajectoire au point où le corps se trouvait à l'instant* t.

30. **Principe de l'égalité de l'action et de la réaction.** —

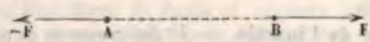


Fig. 8.

Lorsque, dans un système de points matériels, un point A (fig. 8)

exerce sur un autre point B *une action représentée par une force* F *dirigée suivant la droite qui joint les deux points, inversement le point* B *exerce sur le point* A *une réaction, représentée par une force* (—F), *dirigée suivant la même droite et égale, mais opposée, à la force* F.

Les deux premiers principes permettent de résoudre, pour un point matériel unique, les deux problèmes de la dynamique; le troisième principe permet d'en généraliser les solutions et de les étendre au cas d'un système matériel.

31. **Masse.** — 1° *Notion physique de la masse.* — On démontre[1] qu'une même force, étant appliquée à des corps différents, leur imprime en général des mouvements uniformément accélérés, d'accélérations différentes. Il en résulte que les différents corps n'opposent pas la *même résistance* au mouvement; ils ne sont pas *inertes* au même degré. C'est ce qu'on exprime en disant que deux corps, pris au hasard, n'ont *pas la même masse*. Ils seraient, au contraire, *de même masse*, si, étant soumis successivement à la même force, ils prenaient la même accélération.

La masse est une qualité inhérente à chaque corps, indépendante de son état de repos ou de mouvement ainsi que de sa position par rapport aux autres corps de l'univers. La masse résulte de la *quantité de matière* que le corps renferme.

2° *Définition et formule.* — On démontre d'autre part que plusieurs forces F, F′, F″ ..., étant successivement appliquées à un même corps, lui impriment des accélérations différentes $\gamma, \gamma', \gamma''$... qui sont exactement proportionnelles à ces forces (47). Il en résulte que l'on peut écrire, à propos de ce corps, la suite des rapports égaux

$$\frac{F}{\gamma} = \frac{F'}{\gamma'} = \frac{F''}{\gamma''} = \cdots = \text{constante}$$

et que cette constante est caractéristique du corps, au point de vue de *sa résistance au mouvement*, ou de *son degré d'inertie*. Il est donc naturel de prendre ce rapport pour définir cette qualité du corps; et c'est à lui qu'on a donné le nom de *masse*, qui équivaut à celui de *coefficient de résistance au mouvement*. On a donc, par définition, en appelant M la masse d'un corps quelconque,

$$M = \frac{F}{\gamma} = \frac{F'}{\gamma'} = \cdots$$

1. Voir *Mécanique* Maneuvrier et Bergel.

3° *Mesure de la masse.* — Cette formule permet de mesurer facilement la masse d'un corps quelconque. En effet, parmi les forces constantes qu'on peut faire agir sur un corps, la pesanteur est celle dont on dispose le mieux. Elle entre spontanément en action, dès qu'on enlève au corps toute espèce d'appui : elle le fait tomber vers le sol d'un mouvement qui est rectiligne et uniformément accéléré, ainsi que nous le démontrerons plus loin. L'accélération de ce mouvement est la même pour tous les corps, dans un même lieu : on la désigne par g et on l'appelle *accélération* ou *intensité* de la pesanteur. Quant à la résultante des actions de la pesanteur sur le corps, elle est égale à la *pression* que le corps, avant la chute, exerçait sur son appui : c'est ce qu'on appelle le *poids* P du corps ; nous apprendrons plus tard à le mesurer dans chaque cas. On aura donc, en appliquant la formule générale au cas particulier de la pesanteur,

$$M = \frac{P}{g}.$$

La *masse* d'un corps est donc égale au quotient de son *poids* par l'*accélération de la pesanteur*. Le nombre exprimant cette mesure dépend d'ailleurs des unités choisies pour le poids et pour l'accélération.

32. Travail mécanique d'une force constante en grandeur et en direction. — 1° *Cas où le point d'application se déplace dans la direction de la force.* — On appelle *travail de la force* (pour amener son point d'application de A en B) *le produit de l'espace* AB $= e$ (évalué en unités de longueur) *par l'intensité* F *de la force* (évaluée en unités de force). On a, en désignant par T le travail, $T = Fe$.

Si la force agit dans le sens du déplacement XY, on dit qu'elle est *mouvante* et l'on donne au travail le signe $+$; si la force agit en sens contraire du chemin parcouru, on dit qu'elle est *résistante* et son travail est négatif : $T = -(Fe)$ (fig. 9).

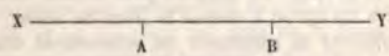


Fig. 9.

2° *Cas d'un déplacement rectiligne qui n'est pas dans la direction de la force.* — Le travail est alors *le produit de la force par le déplacement et par le cosinus de l'angle* α *des deux droites :* $T = Fe \cos \alpha$. *Le travail est* positif ou négatif, suivant que $\cos \alpha$

est + ou —, c'est-à-dire suivant que α est un angle aigu ou obtus (fig. 10).

Dans le cas où α est un angle aigu, la projection de la force sur la direction du déplacement est dirigée dans le même sens que celui-ci : on peut dire que la projection de la force est *mouvante* ; c'est le contraire dans le cas où α est obtus : la projection de la force est *résistante*.

Remarque. — On peut aussi considérer le produit $e \cos \alpha$ comme la projection AB′ du déplacement (fig. 10) sur la direction de la force et faire rentrer ce cas dans le cas précédent.

3° *Le point d'application de la force a un déplacement curviligne.* — Le travail est alors *le produit de la force par la projection de l'arc de trajectoire* MN *sur la direction constante* XY *de la force* : $T = F.M'N'$ (fig. 11).

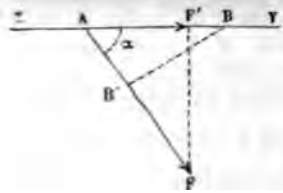


Fig. 10.

Fig. 11.

Il en résulte que le travail d'une force constante en direction ne dépend nullement du chemin réellement parcouru par son point d'application. En effet, que le déplacement ait lieu suivant l'arc MAN ou suivant l'arc MA_1N ou suivant toute autre courbe ayant les mêmes extrémités A et B (fig. 11), le produit $F \times M'N'$ est toujours le même.

33. **Force vive, puissance vive.** — 1° *Cas d'un point matériel.* — On appelle *force vive* d'un point matériel, *à l'instant* t, *le produit de la masse de ce point par le carré de la vitesse qu'il possède à cet instant.*

Si m est la masse du point, V sa vitesse à l'instant t, et si l'on désigne la force vive par W, on aura, par définition,

$$W = mV^2.$$

Ordinairement, c'est la *moitié de ce produit* qui entre dans les *formules de la mécanique : c'est pourquoi* l'on donne quel-

que fois au produit $\frac{1}{2} mV^2$ un nom particulier, celui de *puissance vive*.

2° *Cas d'un système.* — On appelle *force vive* d'un système de points matériels *la somme des forces vives des différents points qui composent le système.* Cette quantité est donc une somme de produits analogues à mV^2. On désigne cette somme par le symbole Σ, et l'on écrit

$$W = \Sigma (mV^2).$$

34. Théorème du travail ou des forces vives. — 1° *Cas d'un point matériel. — Le travail effectué par une force pour amener un point matériel d'une position à une autre sur sa trajectoire est égal à la variation de puissance vive qu'a subie le point matériel pendant ce déplacement.*

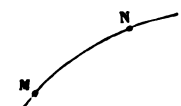


Fig. 12.

Soient m la masse du point matériel, M sa position initiale et V_0 sa vitesse initiale, N sa position finale et V sa vitesse finale (fig. 12). La variation de puissance vive est égale à la demi-variation de force vive $\frac{1}{2} mV^2 - \frac{1}{2} mV_0^2$. Si T est le travail accompli par la force, le théorème s'exprime par l'équation, dite des *forces vives*,

$$T = \frac{1}{2} m (V^2 - V_0^2).$$

2° *Cas d'un système.* — Dans le cas d'un système de points matériels soumis à l'action d'un système de forces quelconques, le théorème s'applique encore, sous une forme plus générale, qui constitue le *principe de la conservation de l'énergie* (37).

35. Transformation du travail en force vive et de la force vive en travail. — Entre le travail mécanique et la force vive il n'y a pas seulement une relation numérique, exprimée par l'équation des forces vives, il existe entre ces deux quantités un rapport naturel de transformation réciproque. Dans un grand nombre de circonstances le travail mécanique se transforme en force vive, ou réciproquement.

Supposons, par exemple, un boulet en fonte, de poids P et de masse M, lancé horizontalement par un canon contre un obstacle matériel, par exemple un massif de terre ou de maçonnerie. L'agent moteur, dans ce cas, est la détente d'une masse gazeuse élevée à une haute température : représentons par F son inten-

sité moyenne pendant la durée de son action. La force F agit sur le boulet pendant le temps qu'il met pour aller du fond de l'âme à la bouche du canon : soit L le chemin parcouru, le travail dépensé par la force sera FL.

Le boulet sort du canon et commence à parcourir sa trajectoire extérieure avec une vitesse initiale V, qui est déterminée par l'équation des forces vives

$$\frac{1}{2} MV^2 = FL.$$

Le travail Fl s'est donc transformé en la puissance vive initiale $\frac{1}{2} MV^2$ du boulet : il s'y retrouve tout entier.

Négligeons les actions retardatrices, telles que la résistance de l'air traversé et l'attraction de la pesanteur : le boulet arrive donc, avec cette même quantité de force vive, au contact de l'obstacle qu'il doit détruire. L'obstacle lui oppose une résistance qu'on pourrait évaluer en unités de force : soit F' sa valeur; le boulet surmonte cette résistance et pénètre dans le massif jusqu'à ce que sa vitesse soit anéantie. Il s'arrête alors, à une profondeur L', qui est déterminée par l'équation des forces vives. En effet, le travail résistant F' L', vaincu par le boulet, est lié à la force vive du boulet par l'équation

$$F' L' = \frac{1}{2} MV^2.$$

Dans ce cas la force vive s'est donc retransformée en travail. C'est ce travail qui constitue le dégât, l'effet destructeur causé par le projectile. Par conséquent, la *puissance vive* $\left(\frac{1}{2} MV^2\right)$ mesure la *puissance de destruction* que le boulet emportait avec lui au sortir du canon. On voit que cette puissance de destruction est proportionnelle au carré de la vitesse et à la masse, ou au poids du projectile. — Cette loi a été depuis longtemps trouvée empiriquement par les artilleurs[1].

56. **Énergie actuelle. — Énergie potentielle. — Énergie totale.** — 1° *Énergie actuelle.* — On voit donc que le produit FL d'une part, c'est-à-dire le travail, et le produit $\frac{1}{2} MV^2$ d'autre part, c'est-à-dire la puissance vive, sont deux expressions équivalentes

1. Jouffret. *Introduction à la théorie de l'énergie.*

d'une même qualité des corps en mouvement, à savoir l'*aptitude à vaincre les obstacles* que possède un corps de masse M, animé d'une vitesse V. C'est cette aptitude qui est proprement appelée *énergie*. Elle peut être exprimée soit par le produit FL, soit par le produit $\frac{1}{2}MV^2$, de même qu'elle peut se manifester tour à tour sous la forme de *travail* ou sous celle de *force vive*.

Pendant qu'elle se manifeste sous l'une ou l'autre forme, on lui donne souvent un nom unique, celui d'*énergie actuelle*, qui signifie énergie *en acte*, ou *énergie de mouvement*. On dit encore, dans le même sens, *énergie dynamique*.

2° *Énergie potentielle*. — Quand l'énergie ne se manifeste sous aucune de ces deux formes mécaniques, elle n'en existe pas moins *à l'état latent*, en quelque sorte, ou bien *en puissance*, comme on dit en philosophie.

Ainsi le système matériel constitué par la Terre d'une part et de l'autre par un corps pesant, une pierre par exemple, de poids P et de masse M, qui serait immobile sur un appui, à la hauteur *h*, n'est pas du tout dans les mêmes conditions, au point de vue de l'énergie, que le même système si la pierre était immobile sur le sol. En effet, si nous supprimons l'appui, de manière à laisser tomber la première pierre, elle acquerra, par le seul fait de sa chute, une énergie actuelle qui ira en croissant, et qui aura atteint la valeur P*h* au moment où la pierre touche le sol. Par conséquent, dans sa position initiale, le corps pesant, tout immobile qu'il était, possédait, *à l'état latent* ou *en puissance*, l'énergie qui s'est ensuite manifestée dans sa chute. C'est à cette sorte d'énergie, énergie tranquille et comme emmagasinée dans le corps, qu'on a donné le nom d'*énergie potentielle* (ou *en puissance*), par opposition à l'énergie actuelle ou *énergie de position*.

Par exemple, une masse d'eau de poids P, située à une hauteur *h*, constitue un approvisionnement d'énergie potentielle égal à P*h*. Cette énergie potentielle est égale à l'énergie actuelle (travail ou force vive) qu'il a fallu dépenser pour élever l'eau à la hauteur *h* et en remplir le réservoir.

De même, lorsqu'on remonte une montre, on dépense une certaine quantité d'énergie dynamique qui s'emmagasine dans le ressort, sous la forme d'*énergie de position*, et qui se retransformera lentement en énergie dynamique, à mesure que le ressort mettra les rouages en mouvement.

3° *Énergie totale*. — La quantité d'énergie de position que possède le ressort de montre, à un moment donné, dépend de la *quantité d'énergie dynamique* qu'on y a emmagasinée en le remon-

tant. Si l'on n'a donné que deux ou trois tours de clef, le ressort n'aura pas acquis toute l'énergie potentielle dont il est susceptible, et il ne pourra pas créer, par sa détente, assez d'énergie dynamique pour faire parcourir aux aiguilles leur course complète sur le cadran. Mais si l'on a donné au ressort son degré de tension maximum, il produira, en se détendant, toute l'énergie qu'il est capable d'emmagasiner d'abord sous la forme potentielle et puis de restituer sous la forme dynamique : c'est ce qu'on appelle l'*énergie totale* du ressort.

On voit que c'est l'*énergie qu'il est capable soit d'emmagasiner en passant de la limite extrême de détente à la limite extrême de tension, soit de restituer en repassant, au contraire, de l'état de tension maximum à celui de détente complète.*

Il en est de même dans le cas des corps pesants. Si, au lieu de porter la masse d'eau à une hauteur h, on l'élève à des hauteurs successivement croissantes, la pesanteur accomplira sur cette masse un travail de plus en plus grand et lui communiquera une énergie potentielle de plus en plus considérable. Pour donner à la pesanteur la plénitude de son action, et emmagasiner dans la masse son énergie totale, il faudrait la supposer élevée jusqu'à une altitude telle, que l'attraction terrestre devint insensible.

Ce cas se réalise approximativement pour les astéroïdes que la Terre rencontre dans sa révolution autour du Soleil, qu'elle entraîne dans sa sphère d'attraction, et qui traversent son atmosphère sous le nom d'*étoiles filantes* ou de *bolides*. L'*énergie totale* d'un de ces bolides, c'est la quantité de force vive qu'il a acquise, depuis l'instant où il a été saisi par la pesanteur jusqu'à l'instant où il touche le sol.

En général, l'énergie totale d'un système matériel, c'est la *quantité maximum d'énergie* que, sous l'influence des forces auxquelles il est soumis, le système peut emmagasiner, sous la forme d'énergie potentielle, pour la restituer ensuite sous la forme d'énergie dynamique.

37. **Principe de la conservation de l'énergie.** — Lorsqu'un corps pesant, de poids P et de masse M, tombe, dans le vide, d'une hauteur h, il acquiert une force vive $\frac{1}{2}$ MV² déterminée par l'équation

$$Ph = \frac{1}{2} mV^2;$$

mais, *en même temps que son énergie dynamique* s'accroît de

$\frac{1}{2}mV^2$, son énergie potentielle diminue de la quantité équivalente Ph. Inversement, lorsqu'un corps pesant s'élève suivant la verticale, son énergie potentielle s'accroît, en même temps que son énergie dynamique diminue de la quantité équivalente. Il s'établit donc une compensation exacte entre ces deux sortes d'énergie, de manière que leur somme, qui est l'énergie totale du corps, reste invariable. C'est dans ce fait que consiste le principe de la conservation de l'énergie. Il ne s'applique pas seulement au cas de la pesanteur; c'est le principe le plus général de la mécanique, et on peut l'énoncer de la manière suivante :

Étant donné un système de points matériels sollicité par des forces intérieures et par des forces extérieures, la demi-variation de force vive du système, relative à un intervalle de temps déterminé, est égale à la somme algébrique des travaux effectués par les forces, tant intérieures qu'extérieures, pendant le même intervalle de temps[1].

Tel est le principe de la conservation de l'énergie, qui est le fondement de la physique moderne, comme le principe de la conservation de la matière est le fondement de la chimie moderne. Nous avons dit que l'objet de la physique est *la matière en mouvement*. Or l'effet immédiat de la matière en mouvement, c'est l'*énergie* : et c'est l'énergie qui produit, par ses transformations, non seulement le travail et la force vive, mais toutes les propriétés des corps, tous les agents physiques, le son, la chaleur, la lumière et les forces de toute nature. Nous pouvons donc dire que l'objet de la physique, c'est *l'énergie et ses transformations*.

38. **Unités métriques d'énergie et de puissance.** — Le travail et la force vive étant deux formes différentes d'une même grandeur, l'énergie, il est naturel de les évaluer au moyen de la même unité.

1° *Kilogrammètre.* — C'est le produit Ph, c'est-à-dire l'expression du travail de la pesanteur qui a servi au choix de l'unité d'énergie. On a pris le travail correspondant à un poids de 1 kilogramme qui déplacerait son point d'application de 1 mètre dans

1. Cet énoncé s'exprime algébriquement par l'équation

$$\sum \frac{mV_1^2}{2} - \sum \frac{mV_0^2}{2} = T_e + T_i,$$

en désignant par V_0 et V_1 la vitesse initiale et la vitesse finale, par T_e le travail des forces extérieures et par T_i celui des forces intérieures.

sa propre direction, et on l'a appelé *kilogrammètre*. Telle est l'unité vulgaire d'énergie, c'est-à-dire l'unité correspondant aux unités du système métrique [1].

La définition du kilogrammètre est complètement indépendante du temps, parce que le travail ne dépend absolument que de l'intensité de la force et du déplacement de son point d'application.

2° *Unité de puissance : Cheval-vapeur.* — Mais dans l'industrie, où l'on doit tenir compte du temps, qui est une denrée fort chère, on définit un autre coefficient d'énergie qui dépend du temps : c'est la *puissance*. On appelle *puissance* d'un moteur la quantité de travail ou d'énergie qu'il peut fournir dans 1 seconde. L'unité de puissance est le *cheval-vapeur*. On appelle *cheval-vapeur le travail de 75 kilogrammètres effectué en 1 seconde.*

Cette unité fut choisie par Watt. Elle équivaut sensiblement à la puissance de 3 chevaux de trait, ou à celle de 7 hommes de peine [2].

1. Dans le *système des unités absolues*, dit *système C. G. S.* (78), on adopte une autre unité d'énergie, qu'on appelle l'*erg* : elle vaut environ un cent-millionième de kilogrammètre.

2. *Horse-power.* — L'unité anglaise de puissance, s'appelle *horse-power* ; elle n'a pas tout à fait la même valeur que le cheval-vapeur : elle est de 75,9 kilogrammètres par seconde.

Poncelet. — Le Congrès international de mécanique appliquée a adopté, en 1889, une nouvelle unité de puissance, le *poncelet*, qui vaut 100 kilogrammètres par seconde. Celui-ci a l'avantage d'avoir une valeur sensiblement égale au *kilowatt*, qui est une unité correspondante en électricité, car

$$1 \text{ poncelet} = 0{,}981 \text{ kilowatt.}$$

D'autre part, le poncelet, étant formé dans le système décimal présente tous les avantages de ce système de numération.

LIVRE II

PESANTEUR

MOUVEMENT ET ÉQUILIBRE DES CORPS PESANTS

CHAPITRE PREMIER

DIRECTION ET NATURE DE LA PESANTEUR

39. **Définition de la pesanteur.** — Nous avons déjà dit que tous les corps qui sont à la surface de la Terre *tombent* vers le sol dès qu'ils ne sont plus appuyés ou soutenus. La cause de ce mouvement est une force dont on ne connaît *à priori* ni l'origine, ni la nature : on l'appelle *pesanteur*.

Tout ce que la simple observation des faits a appris sur la pesanteur, c'est qu'elle s'exerce sur tous les corps solides et liquides, dans quelques conditions qu'ils se trouvent placés : on a exprimé depuis longtemps ce fait général en disant que ces corps sont *pesants*. Il a fallu l'intervention de l'expérience pour démontrer que les gaz sont aussi des corps pesants. Et, si certains corps ne paraissent pas tomber, comme les nuages qui planent dans l'atmosphère et la fumée ou les aérostats qui s'y élèvent, cela tient précisément à ce que l'air est pesant et qu'il exerce sur tous les corps qui y sont plongés une poussée verticale, qui est tantôt égale, tantôt supérieure à l'action directe de la pesanteur.

Quant aux caractères mécaniques de cette force, à sa nature et à son origine physiques, on n'a pu les déterminer que par une étude expérimentale et rationnelle de ses effets.

40. **Direction de la pesanteur. — Fil à plomb.** — La force de la pesanteur sera complètement déterminée quand on connaîtra sa *direction* en un lieu donné, son *point d'application* sur un corps quelconque et l'*intensité* de son action.

Nous allons en chercher tout d'abord la direction.

La direction de la *force, en un lieu quelconque,* sera donnée *exactement par la trajectoire que suivrait un corps* pesant en

tombant librement dans ce lieu. On fixe cette trajectoire dans l'atmosphère, on la matérialise en quelque sorte, à l'aide d'un appareil très employé dans les arts et les métiers sous le nom de *fil à plomb*.

Il se compose d'un fil parfaitement flexible auquel est suspendue une petite balle de plomb (fig. 13). Ce fil, étant fixé par son extrémité supérieure et abandonné à lui-même, prend naturellement, lorsqu'il est en équilibre, la direction de la pesanteur. En effet, à cause de sa flexibilité, il suit exactement la direction que lui imprime le corps pesant, laquelle est la direction de la chute libre, et par conséquent de la pesanteur.

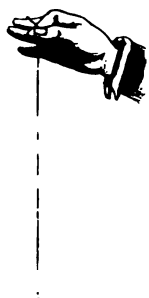


Fig. 13.

La direction de la pesanteur est donc définie expérimentalement par le fil à plomb en équilibre; elle est définie géométriquement par cette propriété du fil à plomb : *La direction d'un fil à plomb en équilibre est normale à la surface libre des eaux tranquilles ou des liquides en équilibre*. La vérification de cette propriété est fondée sur une conséquence des lois de la réflexion de la lumière, que nous admettrons pour le moment :

L'image d'une droite lumineuse, donnée par une surface plane réfléchissante, est une droite symétrique de la première par rapport au plan du miroir.

Or, si un fil à plomb OA, suspendu au-dessus d'un bain de mercure (fig. 14), est normal à la surface plane du liquide, son image vue dans le mercure ne pourra lui être symétrique qu'en se mettant exactement sur son prolongement. Il est facile de s'en assurer. Un observateur n'a qu'à placer un second fil à plomb IB entre son œil et le fil OA, de manière à cacher complètement ce dernier : il constatera que l'image du fil est cachée en même temps que le fil lui-même; donc cette image est comprise dans le plan déterminé par les deux fils parallèles OA et IB. — En prenant une autre position par rapport au fil OA, l'observateur arrivera au même résultat, c'est-à-dire qu'il pourra cacher à la fois le fil OA et son image par l'interposition du fil IB : donc cette image est également comprise dans le nouveau plan déterminé par OA et la nouvelle position de IB. Cette image, devant se trouver à la fois dans les deux plans, coïncide avec leur intersection, laquelle est précisément OA ; *donc l'image de* OA *est sur le prolongement même de* OA : donc la direction de OA est normale à la surface plane du mercure.

du fil à plomb. — Dans le voisinage d'une grande masse de
mme une montagne ou un massif continental, le fil à plomb est
t dévié de la verticale. La Condamine et Bouguer ont constaté qu'au
mboraço la
t de 7",5 et
ile 11" près
Schihallien,

Fig. 14.

ticale. —
ale et Ho-
Cette di-
'appelle la
du lieu.
plomb dé-
a verticale
même où
pendu.
ertical. —
n passant
verticale
s'appelle
ical.
horizontal.
plan per-
ire à la
e est un
rizontal.
ple, la sur-
eaux tran-
du moins
isinage de
le, est un
zontal.
itale. —
— Toute
cée dans un plan horizontal est une *horizontale*. On
orizon visuel d'un lieu, ou simplement *horizon*, la ligne
suivant laquelle le plan horizontal qui passe par l'œil
ervateur coupe la calotte sphérique du ciel.
ES. — 1° Si la surface des eaux tranquilles était plane,
s verticales des différents lieux seraient parallèles.
ait que la surface terrestre, abstraction faite des inéga-
lientelles *du sol, est une surface convexe*. La verticale
est donc une droite perpendiculaire au plan tangent

en un point d'une surface convexe, — plan tangent qui se confond d'ailleurs avec la surface même, sur une certaine étendue; il en résulte que les verticales des différents lieux ne sont pas des droites parallèles.

Ce défaut de parallélisme est difficile à constater pour de faibles distances. Ainsi deux verticales dont la distance horizontale est de 31 mètres ne forment qu'un angle de 1″. Il faut une distance de 1860 mètres pour faire un angle de 1′, et de 111 kilomètres pour 1°. Les verticales AZ et AZ′ ou AZ″, qui font entre elles un angle d'environ 3° (fig. 15), correspondent à deux points distants de 333 kilomètres. De Paris à Dunkerque la verticale s'incline de 2° 12′, et de 7° 28′ entre Paris et Barcelone[1].

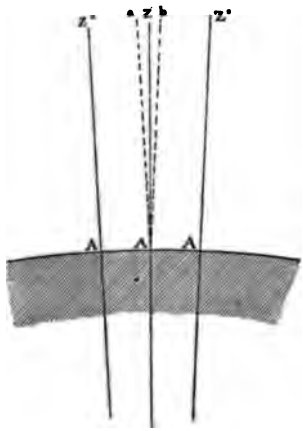


Fig. 15.

2° Si la surface terrestre était parfaitement sphérique, toutes les verticales Z, Z′, Z″, etc., seraient perpendiculaires à des plans tangents à la sphère, et iraient se couper en son centre. On pourrait donc dire qu'*en chaque lieu la pesanteur est dirigée vers le centre de la terre*. Mais on sait que la terre est un globe sphéroïdal, aplati à ses deux pôles, qui présente, en outre, certaines irrégularités de forme sur ses méridiens et sur ses parallèles et qui est animé d'un mouvement uniforme de rotation dans le sens direct. Il en résulte que la conclusion précédente n'est qu'approximative, parce que la pesanteur n'est pas seule en jeu pour fixer la direction du fil à plomb en chaque lieu.

42. Caractères de la pesanteur. — Définition du poids et du centre de gravité des corps. — De ce que la verticale a une direction constante dans un même lieu, nous pouvons déjà conclure que le mouvement des corps qui tombent est un mouvement rectiligne, et, par suite, que la cause de ce mouvement, c'est-

1. Ces nombres ont été calculés en négligeant l'influence de la rotation de la Terre sur la direction du fil à plomb en un lieu.

à-dire la pesanteur, est une force *constante en direction*. L'étude expérimentale de ce mouvement nous démontrera en outre : 1° que ce mouvement est le même pour tous les corps pesants, quelque petits qu'ils soient ; 2° qu'il est uniformément accéléré. Nous en conclurons que la pesanteur est une force *constante en intensité* comme en direction, et qu'elle agit également sur tous les corps, et sur toutes les particules des corps.

Nous pouvons donc, dès à présent, nous représenter un corps pesant comme un corps soumis à un nombre considérable de petites forces provenant de la pesanteur. Toutes ces forces, étant verticales et très rapprochées, peuvent être considérées comme rigoureusement parallèles. Elles ont donc une résultante unique : c'est ce qu'on appelle le *poids du corps*[1].

Le poids est appliqué en un point du corps, qui est le centre de ces forces parallèles : on appelle ce point d'application le *centre de gravité*[2] du corps.

Reste à démontrer que le centre de gravité est un point fixe et le poids une force constante pour un corps déterminé. Ce sera là une conséquence immédiate des lois de la chute des corps que nous allons exposer.

CHAPITRE II

LOIS DE LA CHUTE DES CORPS. — CENTRE DE GRAVITÉ. ÉQUILIBRE DES SOLIDES PESANTS.

45. Énoncé des lois. — Le mouvement des corps qui tombent s'appelle *mouvement de chute* ou simplement *chute*. Les lois de ce mouvement ont été recherchées expérimentalement et découvertes par Galilée, à la fin du XVIe siècle. On peut les énoncer de la manière suivante :

1re Loi. — *Tous les corps tombent également vite dans le vide.*

Cette loi signifie que, *dans le vide*, tous les corps, quelles qu'en

1. On dit quelquefois la *pesanteur* d'un corps. C'est là une expression vicieuse. Le mot *pesanteur* doit être réservé pour désigner la cause du poids, cause variable dans l'intensité de ses effets, suivant la quantité de matière sur laquelle elle agit. Le *poids* est précisément la mesure de cette intensité.

2. Dans cette expression, *gravité* est synonyme de pesanteur. On dit de même corps *graves* au lieu de corps *pesants*.

soient la nature, la masse et la forme, mettent des temps égaux pour tomber de la même hauteur.

2° Loi des espaces. — *Les espaces parcourus par un corps qui tombe librement dans le vide sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.*

Cela veut dire que, si l'espace parcouru au bout de 1 seconde est égal à e_1 mètres, les espaces successivement parcourus au bout de 2°, 3°, 4°..., t° seront respectivement égaux à $4\,e_1$, $9\,e_1$, $16\,e_1$..., $t^2\,e_1$.

Corollaire. — Il en résulte que l'espace parcouru pendant la deuxième seconde est $4\,e_1$ moins e, ou $3\,e_1$; pendant la troisième seconde, il est $9\,e_1$ moins $4\,e_1$, ou $5\,e_1$; dans la quatrième, $16\,e_1$ moins $9\,e_1$, ou $7\,e_1$, et ainsi de suite. De là cette conséquence de la loi des espaces : *Les espaces parcourus successivement pendant la première, la deuxième, la troisième, la quatrième... seconde de la chute sont entre eux comme la suite naturelle des nombres impairs* 1, 3, 5, 7...

3° Loi des vitesses. — *Les vitesses acquises par un corps qui tombe librement dans le vide, sont proportionnelles aux temps écoulés depuis le commencement de la chute.*

On a vu précédemment (18, 3°) ce qu'il faut entendre par *vitesse* dans un mouvement varié. Cet énoncé signifie que si la vitesse, ainsi définie, est égale à v_1 au bout de la 1re seconde de chute, elle sera égale à $2\,v_1$ au bout de 2°, à $3\,v_1$ au bout de 3°..., enfin à $t\,v_1$ au bout du temps t.

44. Vérification expérimentale des lois. — 1re Loi. — Plusieurs faits d'observation courante semblent contredire cette proposition. Des corps de nature différente et de formes diverses (feuille de papier, balle de plomb, plume, etc.) tombent manifestement dans l'air avec des vitesses très différentes[1].

Expérience de Galilée. — Galilée le premier attribua ces inégalités de vitesse à la résistance de l'air. Il fit tomber, du haut de la tour penchée de Pise, des corps inégalement pesants, mais de même volume extérieur, des boules de plomb, de cuivre, de marbre, de cire, et il constata que ces corps arrivaient à terre *sensiblement* au même instant.

Expérience de Newton. — Newton compléta la démonstration de Galilée en supprimant la résistance de l'air, au lieu de se contenter de l'atténuer. Il eut l'idée de faire tomber les corps inégalement pesants, non plus dans l'air, mais dans le vide. On répète son expérience de la manière suivante :

On prend un tube de verre de deux mètres de longueur environ,

1. Aristote en avait conclu, et les anciens croyaient d'après lui, que les corps *tombent d'autant plus vite* qu'ils sont *plus pesants*.

fermé à l'une de ses extrémités par une calotte métallique et terminé à l'autre par une douille métallique mastiquée. Celle-ci se prolonge par un tube à robinet de cuivre pouvant se visser sur la platine d'une machine pneumatique. On y introduit une balle de plomb, un fragment de liège, un bout de papier, une barbe de plume; puis on y fait le vide. Retournant ensuite le tube brusquement, on voit tous les corps qu'on y a introduits tomber ensemble, sans que l'un d'eux prenne de l'avance ou du retard sur les autres. Mais si, après avoir fait rentrer un peu d'air, on renverse de nouveau le tube, on remarque un faible retard pour les corps les plus légers. Ce retard devient très apparent lorsqu'on a laissé rentrer l'air complètement. Si donc, dans les conditions ordinaires, les différents corps tombent inégalement vite, cela provient uniquement de la résistance de l'air, qui les retarde inégalement dans leur chute.

Expérience du marteau d'eau. — Cette résistance est surtout sensible pour les liquides. Dans l'air, ils se divisent et tombent en gouttelettes; dans le vide, au contraire, ils tombent en bloc et sans se diviser, comme ferait une masse solide. On montre ce phénomène avec le *marteau d'eau*. On nomme ainsi un tube de verre un peu gros, de 30 à 40 centimètres de long, qu'on a rempli d'eau à moitié, puis fermé à la lampe après en avoir chassé l'air par une ébullition prolongée (fig. 16). Lorsqu'on retourne ce tube brusquement, l'eau, en tombant, vient frapper l'extrémité inférieure en rendant un son sec, analogue à celui d'un corps solide venant choquer la paroi du verre.

Fig. 16.

2e et 3e Loi. — Deux graves difficultés se présentent dans la vérification des autres lois. D'abord, la rapidité de chute d'un corps qui tombe librement rend son mouvement difficilement observable. De plus, comme on ne peut pas opérer dans le vide, la résistance de l'air produit nécessairement une perturbation d'autant plus grande que *la chute est plus rapide*. Pour vérifier les

lois avec facilité et avec rigueur, on a dû inventer des appareils spéciaux qui permettent d'atténuer la difficulté d'observation et de supprimer la cause d'erreur. Ce sont le *plan incliné de Galilée*, la *machine d'Atwood* et l'*appareil de Morin*.

45. **Plan incliné.** — Galilée a le premier résolu le problème expérimental qui consiste à ralentir le mouvement de la chute des corps, de manière à le rendre aisément observable, sans en altérer la nature. Il démontra, en effet, que « *un corps pesant descend suivant la verticale avec une force plus grande que lorsqu'il descend suivant un plan incliné, dans la proportion où la ligne de plus grande pente du plan est plus longue que la verticale* ». Cette proposition est le principe même de sa méthode.

1° *Principe de l'appareil.* — On appelle *plan incliné* tout plan qui fait avec un plan horizontal un angle moindre qu'un droit.

Soit BAC la section du plan incliné par un plan perpendiculaire à la fois à ce plan et au plan horizontal, et par suite à leur intersection : l'angle BAC est l'angle plan du dièdre formé par le plan incliné avec l'horizon (fig. 17) et AB en est la *ligne de plus grande pente*. Soit BC une perpendiculaire abaissée d'un point quelconque B de la ligne AB sur la ligne AC : BC s'appelle la *hauteur* du plan incliné et AB en est la *longueur*. Soit enfin M la section d'un corps quelconque s'appuyant sur le plan incliné : son poids P pourra être décomposé en deux forces Q et F, l'une perpendiculaire, l'autre parallèle au plan incliné. La première sera détruite par la résistance du plan et n'aura pas d'effet utile au point de vue du mouvement; la force F agira seule sur la masse M pour la faire descendre. Pour calculer la valeur de F, on porte sur GP une longueur GH qui représente le poids P, et l'on achève le parallélogramme DGEH; la force F est alors représentée par GD. Or les triangles DGH et ABC sont semblables, comme ayant les angles égaux. On en déduit que

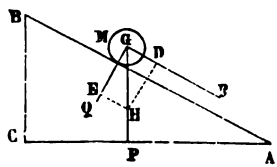


Fig. 17.

$$\frac{GD}{GH} = \frac{BC}{AB}, \qquad \text{ou} \qquad \frac{F}{P} = \frac{BC}{BA}.$$

Cette égalité démontre la proposition de Galilée. On voit en effet que F est une fraction de P, ayant pour numérateur la hauteur du plan et sa longueur pour dénominateur. Or cette fraction

est égale à sin α, α étant l'inclinaison BAC. On peut donc, en augmentant cette inclinaison, rendre la force F aussi petite qu'on le veut. Par suite, on peut ralentir la chute du mobile M sur le plan incliné, de manière à observer aisément les chemins parcourus en 1, 2, 3... secondes. Et le mouvement n'est pas altéré dans sa nature, car si le poids P est constant et continu, sa composante F l'est également. Quant à la résistance de l'air, son influence perturbatrice sera d'autant plus atténuée qu'on ralentira davantage la vitesse de la chute.

2° *Vérification de la loi des espaces.* — Galilée avait réalisé son plan incliné en creusant dans une longue barre de bois (de 7m,20 environ) un canal bien lisse et bien dressé. Il n'avait qu'à soulever plus ou moins l'une des extrémités de la barre pour faire varier à volonté l'inclinaison du plan. Le mobile était une boule de bronze dur, très bien polie; il l'introduisait dans la rigole, et il notait, non pas les espaces parcourus au bout de 1, 2 secondes, etc., mais, ce qui revient au même, les temps qu'elle mettait pour parcourir d'abord le canal tout entier, puis 1/4, puis 1/9, etc. de sa longueur. Il trouva que ces temps successifs variaient comme les nombres 1, 1/2, 1/3, etc.

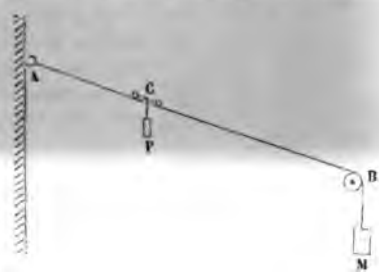


Fig. 18.

Appareil de cours. — On peut répéter plus simplement ces expériences en prenant pour plan incliné un fil de soie (fig. 18) tendu obliquement entre un clou A et une petite poulie B, à l'aide d'un poids M qui s'attache à l'extrémité libre. Le long de ce plan incliné on fait descendre un petit équipage mobile C, formé de deux poulies accouplées et soutenant un poids P. En laissant tomber l'équipage pendant des temps progressivement croissants, on vérifiera la loi des espaces. En déplaçant le point d'attache A, de manière à faire varier l'inclinaison, on vérifiera le principe même de l'appareil.

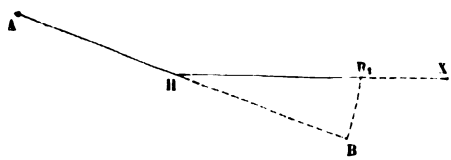


Fig. 19.

3° *Vérification de la loi des vitesses.* — La loi des vitesses résulte nécessairement de la loi des espaces et il est inutile de la vérifier. En effet, Galilée s'était dispensé de cette vérification. Toutefois on pourrait la réaliser très simplement.

Supposons qu'en un point H du plan incliné (fig. 19) on redresse le fil, de manière à tendre le bout HB_1 horizontalement, dans la direction B_1X. Le mobile, étant lâché en A au temps zéro, arrivera en H, au temps t, avec une certaine vitesse V : la force accélératrice *étant brusquement supprimée* en ce point, on

sait que le mobile continuera à *se mouvoir uniformément* avec cette vitesse V; on n'aura donc qu'à mesurer l'espace parcouru pendant 1 seconde, à partir de l'instant t, pour obtenir la vitesse V à l'instant t. De même, pour obtenir la vitesse V' à l'instant t', il suffira de redresser le fil à partir du point que le mobile a atteint à l'instant t'. On vérifiera ainsi que les vitesses V, V'... sont sensiblement proportionnelles aux temps t, t'....

46. **Machine d'Atwood.** — L'appareil le plus commode pour démontrer approximativement les lois de la chute des corps fut inventé par Atwood[1] : on l'appelle *machine d'Atwood*.

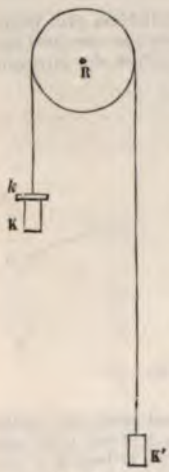


Fig. 20.

La machine d'Atwood, comme le plan incliné, donne le moyen 1° de ralentir la vitesse de la chute des corps, sans altérer la nature du mouvement; 2° d'atténuer, par cela même, dans une large mesure, l'effet perturbateur de la résistance de l'air.

1° *Principe.* — Réduite à son organe essentiel, la machine se compose d'une poulie R (fig. 20), très légère et très mobile, sur laquelle passe un fil, parfaitement flexible et inextensible, soutenant à ses extrémités deux masses égales K et K'. Ce système est en équilibre dans toutes les positions relatives des deux masses, car le poids du fil est complètement négligeable vis-à-vis des deux poids égaux, P, de celles-ci. Mais supposons qu'on élève l'une des masses K jusqu'au haut de sa course, et qu'on place au-dessus d'elle une *masse additionnelle* k, ayant un poids égal à p. Le système tout entier sera entraîné par cette surcharge, et prendra un mouvement qui sera évidemment plus lent que dans la chute libre. En effet, si le poids p, *supposé constant*, n'agissait que sur sa propre masse m, comme cela aurait lieu en chute libre, il lui imprimerait un mouvement uniformément accéléré, dont nous appellerons g l'accélération. En agissant sur la masse m augmentée des masses M et M des corps K, K', il imprime encore à la masse totale $(2M + m)$ un mouvement uniformément accéléré. Soit γ l'accélération de ce dernier. Les accélérations qu'une même force imprime à deux masses différentes étant inversement proportionnelles à ces masses, on aura entre g et γ la relation

$$\frac{\gamma}{g} = \frac{m}{2M + m},$$

1. *Professeur à Cambridge*, en 1784.

Fig. 21.

d'où l'on tire

$$[1] \quad \gamma = g \cdot \frac{m}{2M + m}.$$

Donc γ, c'est-à-dire l'accélération de la chute dans la machine d'Atwood, est une fraction de g dont le numérateur

Fig. 22.

est m et le dénominateur $2M + m$. Elle sera donc aussi petite qu'on le voudra. De plus, si g est constant, c'est-à-dire si le mouvement dans la chute libre est uniformément accéléré, γ sera également constant : la réciproque sera également vraie[1].

1. Remarque. — Au lieu des masses *du système M, M', m*, on en considère *plus ordinairement* les poids, qu'on

2° *Description.* — Une colonne en bois (fig. 21) de 2m,30 environ de hauteur porte à son sommet la poulie R. Cette poulie est ordinairement en cuivre, mais il est plus avantageux de la faire en aluminium ; elle est généralement recouverte d'une cage en verre. Sur la poulie s'enroule un fil de soie, assez fin pour que son poids puisse être négligé ; ce fil soutient, à ses deux bouts, deux poids égaux K, K'. L'axe de la poulie, au lieu de reposer sur deux coussinets fixes, s'appuie sur les jantes croisées de quatre roues mobiles (fig. 22). Grâce à ce dispositif, l'axe de la poulie transmet son mouvement aux quatre roues et, au lieu d'un frottement de glissement, il se produit un frottement de roulement qui est beaucoup plus doux.

Fig. 23

Fig. 24.

Fig. 25.

Fig. 26.

Fig. 27.

Fig. 28.

Sur le devant de la colonne est fixé un mouvement d'horlogerie H, que règle un pendule à secondes P, muni d'un échappement

Fig. 29.

détermine directement. On sait que pour chacun des corps pesants on a la relation

$$m = \frac{p}{g} \qquad \text{et} \qquad M = \frac{P}{g}.$$

En substituant ces valeurs dans l'équation précédente, elle devient

$$[2] \qquad \gamma = g \cdot \frac{p}{2P + p}.$$

Si nous faisons, par exemple, $P = 16$ *et* $p = 1$, *on aura* $\gamma = \frac{1}{33} g$. *L'accélération sera donc 33 fois moins grande.*

à ancre. L'axe de la roue dentée, qui est réglée par l'échappement, porte, à l'extrémité antérieure, une aiguille qui marque les secondes, et à l'extrémité postérieure, derrière le cadran, un excentrique *e* (fig. 23), qui tourne avec l'aiguille dans le sens de la flèche. Cet excentrique peut, en appuyant sur le levier *ba*, faire basculer un plateau *n* sur lequel se place le corps *m* dont on veut observer la chute. Ce plateau, qui est mobile autour d'un axe horizontal, tend à basculer spontanément par son propre poids; mais il est maintenu horizontal, au moyen d'un taquet *i* dont il est muni, qui s'appuie sur le bout supérieur *a* du levier *ab*, tant que celui-ci est dans sa position normale. Dès que l'extrémité *b* du levier est chassée par l'excentrique, l'extrémité *a* abandonne le taquet et le plateau *n* bascule en laissant tomber le poids qu'il soutenait. Le système est réglé de façon que la chute commence au moment précis où l'aiguille du cadran H arrive au zéro de la graduation.

Enfin, parallèlement à la colonne est fixée une échelle de bois qui est divisée en centimètres : elle est destinée à mesurer les espaces parcourus par le corps qui tombe. Sur cette échelle sont deux *curseurs*, A et B, c'est-à-dire deux pièces mobiles qui, à l'aide de vis de pression, peuvent se fixer à telle hauteur qu'on veut. Ils sont représentés, dans différentes positions, par les figures 25 à 29. L'un d'eux, A, porte un disque plein, qui sert à arrêter le mobile à un instant quelconque de sa chute : c'est le *curseur plein*; l'autre, B, est évidé en forme d'anneau : c'est le *curseur évidé*. Celui-ci se laisse traverser par le corps qui tombe, mais arrête au passage le poids additionnel, qui consiste en une lame de laiton *m* (fig. 25), plus longue que le diamètre intérieur de l'anneau.

3° *Vérification de la loi des espaces.* — Le pendule P est arrêté et l'aiguille du cadran fixée au delà du zéro. On met le poids additionnel *m* sur le poids K, et l'on pose celui-ci ainsi chargé sur le plateau *n* (fig. 23), maintenu horizontal en face du zéro de l'échelle. On lâche ensuite le balancier de l'horloge; l'aiguille parcourt son cadran, et lorsqu'elle passe au zéro, la plate-forme s'abaisse automatiquement, en laissant tomber le poids. On déplace alors le curseur plein sur l'échelle graduée, jusqu'à ce qu'il arrête le poids au bout de la première seconde de chute. On n'y parvient qu'après une série de tâtonnements. La bonne position est trouvée (fig. 24) quand le choc du poids contre le curseur coïncide avec le deuxième battement du balancier (à partir du zéro).

La distance du curseur au zéro de l'échelle donne l'espace parcouru pendant la première seconde. Supposons-le égal à 7 divisions. Recommençons alors l'expérience de la même manière.

mais en n'arrêtant le poids qu'au bout de la deuxième seconde. On constate qu'il faut, pour cela, placer le curseur plein juste en face de la 28ᵉ division de l'échelle (fig. 25) : donc l'espace parcouru en 2 secondes est égal à 4 fois 7 divisions, c'est-à-dire au quadruple de l'espace parcouru pendant 1 seconde. On trouve de même qu'une hauteur 9 fois plus grande, ou de 63 divisions, est parcourue en 3 secondes, et ainsi de suite : la loi des espaces est donc vérifiée.

4° *Vérification de la loi des vitesses.* — Il faut se rappeler que, dans le mouvement varié, on entend par vitesse à un instant donné celle du mouvement uniforme qui succéderait au mouvement varié, si à cet instant on supprimait la force accélératrice (29). Par conséquent, pour vérifier la loi, il suffit de mesurer les vitesses des mouvements uniformes qu'on substitue au mouvement accéléré, successivement après 1, 2, 3... secondes de chute.

Pour cela on commence par placer le curseur annulaire B à une distance telle (fig. 26), que le système mobile mette 1 seconde à y arriver. Le poids additionnel étant alors arrêté par le curseur B (fig. 27), le poids K continue seul à descendre. On cherche par tâtonnements à l'arrêter, à l'aide du curseur plein, juste au bout de la deuxième seconde. La distance des deux curseurs représente alors la vitesse acquise au bout de 1 seconde de chute.

Dans une deuxième expérience, on place le curseur annulaire B à une distance 4 fois plus grande que la première fois (fig. 28), en sorte que le poids additionnel ne soit enlevé qu'après 2 secondes de chute. En cherchant alors à arrêter le système au bout de la troisième seconde par le curseur plein, on trouve qu'il faut fixer celui-ci à une distance du curseur B double de celle qui les séparait tout à l'heure. Donc la vitesse acquise au bout de 2 secondes est double de celle qui était acquise après 1 seconde. On constate de même qu'après 3, 4, 5 secondes de chute cette vitesse est 3, 4, 5 fois plus grande : donc la troisième loi est vérifiée.

47. **Vérification des principes de dynamique.** — La machine d'Atwood peut servir à vérifier aisément l'un des théorèmes fondamentaux de la dynamique, à savoir que *les accélérations* $\gamma, \gamma', \gamma''$... *imprimées à une même masse par diverses forces* constantes F, F', F''... *sont proportionnelles aux intensités de ces forces* (31, 2°).

On prend deux masses K et K' formées chacune d'un certain nombre de rondelles de laiton, ayant le même poids p que la masse additionnelle.

Première expérience. — K et K' sont formés chacun par exemple de 16 rondelles. On met sur K le poids additionnel p, et l'on observe le mouvement. Soit e_1 l'espace mesuré au bout de 1 seconde, on en déduit $\gamma = 2\,e_1$.

Deuxième expérience. — On prend à K' une de ses rondelles et on la place sur K. La masse totale du système n'est pas changée, mais la force accéléra-

trice qui est toujours égale à la différence des deux poids, est devenue $5\,p$,

$$18p - 15p = 3\,p,$$

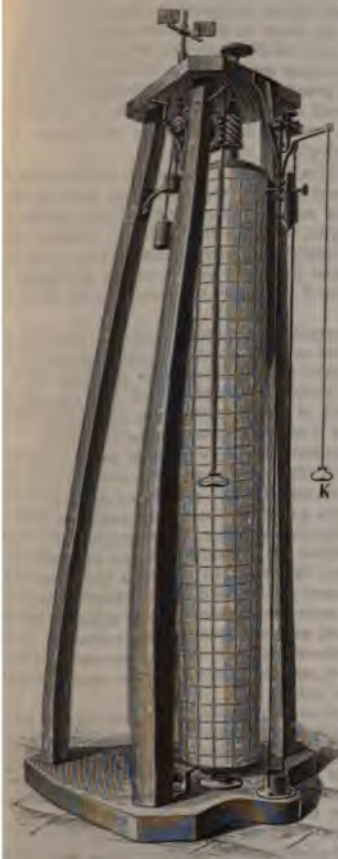


Fig. 30.

Fig. 31.

c'est-à-dire qu'elle est triple de ce qu'elle était précédemment. Observons le mouvement; soit e'_1 l'espace mesuré au bout de 1 seconde; on en déduit $\gamma' = 2e'_1$. En comparant γ' à γ, on constate que $\gamma' = 3\gamma$.

Troisième expérience. — On enlève à K' une autre rondelle pour la reporter sur K. La masse totale ne change pas, mais la force accélératrice devient $5\,p$; elle est 5 fois plus grande que dans la première expérience. En mesurant l'espace e''_1, on en déduit $\gamma'' = 2e''_1$ et l'on constate que $\gamma'' = 5\gamma$.

Ces trois expériences *prouvent bien que les accélérations sont* proportionnelles *aux forces accélératrices.*

48. Appareil de Morin. — 1° *Principe de l'appareil.* — Cet appareil, dont l'idée première est due à Poncelet, est fondé sur un tout autre principe que les appareils précédents. Il ne sert pas à ralentir la vitesse du mobile qui tombe, mais il force ce corps à tracer lui-même ce qu'on appelle un *diagramme* ou un *graphique* de son mouvement, c'est-à-dire une courbe qui permet d'étudier géométriquement toutes les particularités de la chute et d'en déterminer les lois. Quant à l'influence perturbatrice de l'air, elle est éliminée par la faible durée de l'expérience : le mobile ne tombe que pendant une fraction de seconde, et sa vitesse n'a pas le temps de devenir assez grande pour que la résistance de l'air puisse la retarder sensiblement. L'appareil de Morin appartient à la catégorie des appareils enregistreurs, dont nous verrons de nombreux spécimens en acoustique, en télégraphie et en météorologie.

2° *Description.* — Un bâti en bois (fig. 30 et 31) sert à maintenir verticalement un cylindre en bois M, très léger et pouvant tourner librement sur deux pivots. Avant chaque expérience, on recouvre la surface du cylindre d'une feuille de papier, quadrillé en carrés ou en rectangles. On colle le papier de manière que l'une des directions des côtés soit horizontale et, par suite, l'autre verticale. Les verticales serviront à mesurer l'espace parcouru par le corps qui tombe le long du cylindre, et les lignes horizontales à partager la durée de la chute en intervalles égaux.

Le mobile est une masse de fonte P, portant un crayon *i* qui est pressé contre le papier par un petit ressort (fig. 31). Dans sa chute, cette masse est guidée par deux fils de fer bien tendus qui passent dans des oreilles sur ses deux côtés. A sa partie supérieure, la même masse porte un mentonnet qui s'appuie sur l'extrémité d'un levier coudé AC. Par suite, si l'on tire sur un cordeau K attaché au levier, celui-ci lâche le mentonnet, et la masse P commence sa chute.

Quant à la rotation du cylindre, elle s'obtient à l'aide d'un poids Q suspendu à une corde qui s'enroule sur un treuil G (fig. 31). L'axe de celui-ci porte à un bout une roue dentée *c* qui mène deux vis sans fin *a* et *b*, dont la première fait tourner le cylindre et l'autre deux ailettes *x* et *x'*. A l'autre bout du treuil est une roue à rochet *o* dans les dents de laquelle s'engage l'extrémité d'un rochet B, qui empêche le treuil et tout le système de tourner. Mais en tirant sur un cordeau H attaché au rochet on rend libre la roue *o*, le poids Q descend et tout le système se met à tourner. Le mouvement est d'abord accéléré, puisqu'il est produit par la chute d'un corps pesant; mais l'air oppose aux ailettes une résistance qui croît beaucoup plus rapidement que la vitesse de rotation, de sorte que l'accélération imprimée par la pesanteur finit par être annulée, et la rotation par devenir uniforme. Ce résultat est sensiblement obtenu quand le poids Q a parcouru environ les trois quarts de sa course.

3° *Opération.* — Le mobile étant maintenu en haut de l'appareil, on laisse le crayon appuyer sur le papier pendant qu'on fait tourner à la main le cylindre : on trace aussi un cercle, sur lequel se trouvera un point de départ du mobile. On retire alors le crayon en arrière, tout en laissant le mobile en place, et on lâche le poids moteur de manière à commencer le mouvement de rotation du cylindre. A l'instant où l'on juge que ce mouvement est devenu uniforme, on tire vivement sur le cordeau K, et la masse P tombe verticalement.

Si le cylindre M était fixe, le crayon tracerait sur le papier une ligne droite qui serait une génératrice du cylindre; mais comme le cylindre tourne d'un mouvement uniforme, le crayon trace une courbe *mn* (fig. 32). Cette courbe est la trajectoire du mouvement résultant des deux autres mouvements, dont l'un est le mouvement uniforme du cylindre et l'autre le mouvement inconnu du corps pesant. C'est l'étude de cette courbe qui va permettre de vérifier les lois de la chute des corps.

4° *Vérification de la loi des espaces.* — On fend la feuille de papier suivant une génératrice, et on l'enlève de dessus le cylindre ; si on la développe alors

sur un plan, on obtient sensiblement la courbe, tracée en trait plein, de la figure 32. Les longueurs *ma*, *ma'*, *ma''*, *ma'''*, comptées sur le cercle de départ, rectifié à partir de l'origine, sont proportionnelles aux temps 1, 2, 3... et peuvent représenter ces temps; les droites *ac*, *ac'*, *ac''*, *ac'''*... représentent les espaces parcourus respectivement par le mobile pendant ces intervalles de temps. Or, si l'on prend la distance *ac* pour unité de longueur, c'est-à-dire si on la suppose égale à 1, on trouve que $a'c'$ vaut 4, que $a''c''=9$, que $a'''c'''=16$: ce qui prouve que les espaces *ac*, $a'c'$, $a''c''$... croissent comme les carrés des temps 1, 2, 3, 4....

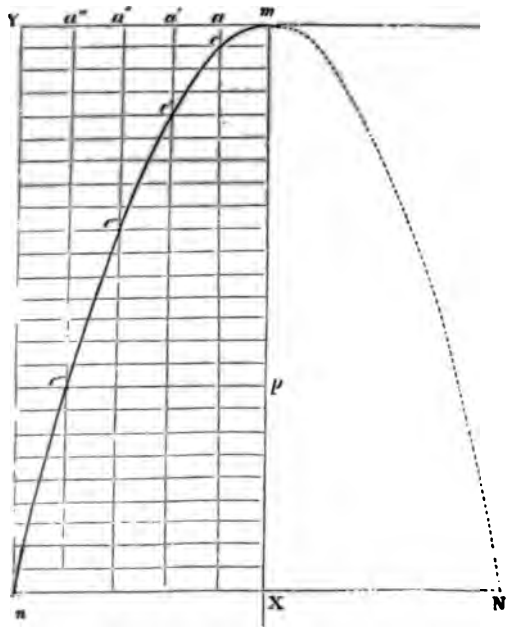


Fig. 32.

5° *Détermination graphique du sommet de la courbe.* — La relation précédente peut s'exprimer comme il suit : *Les distances des points de la courbe à une perpendiculaire à l'axe menée par son sommet sont proportionnelles aux carrés des distances de ces mêmes points à l'axe lui-même.* Cette propriété géométrique définit la courbe appelée *parabole*. Ainsi le *diagramme* de la chute est une branche de *parabole* : le point *m* en est le sommet, la droite *m*X, direction du mouvement uniformément accéléré, en est l'axe, et la droite *m*Y, direction du mouvement uniforme, en est la tangente au sommet.

On profite de cette remarque *pour déterminer avec précision* le sommet de la courbe, *lequel reste toujours incertain. On n'a pour cela* qu'à appliquer l'une *des propriétés géométriques de la parabole. Si l'on mène* les tangentes en deux

points c' et c'' (fig. 33), et qu'on leur élève respectivement des perpendiculaires aux points t' et t'' où elles coupent la tangente au sommet, ces droites se coupent en un même point de l'axe qui est le *foyer* de la parabole. En abaissant de ce point une perpendiculaire sur la tangente au sommet, le point d'intersection sera exactement le sommet de la courbe et par suite l'origine des espaces.

5° *Vérification des principes de cinématique.* — L'identité de ce diagramme avec une parabole démontre expérimentalement un théorème relatif à la composition de deux mouvements rectilignes, dont l'un est uniforme et l'autre uniformément varié sans vitesse initiale : on voit que le mouvement résultant a pour trajectoire une parabole orientée comme la courbe *mn*.

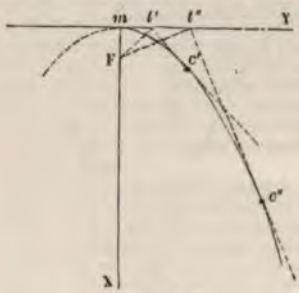


Fig. 33.

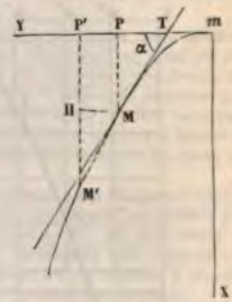


Fig. 34.

6° *Vérification de la loi des vitesses.* — On démontre aisément que, en menant la tangente en M à la courbe, et en cherchant dans les tables la tangente trigonométrique de l'angle α (fig. 34), on aura une grandeur proportionnelle à la vitesse du mobile à l'instant t. De même, en faisant la même construction pour un autre point M' de la courbe, on aura une grandeur proportionnelle à la vitesse V' à l'instant t'. En prenant le rapport $\frac{\text{tang } \alpha}{\text{tang } \alpha'}$ on vérifiera qu'il est égal au rapport $\frac{t}{t'}$.

49. Expériences de MM. Cailletet et Colardeau à la tour Eiffel. — MM. Cailletet et Colardeau ont récemment installé sur la tour Eiffel, à la deuxième plateforme, un dispositif expérimental qui leur permet d'étudier la chute libre des corps en tenant compte de la résistance de l'air. Ils ont réalisé ainsi une sorte d'immense machine de Morin de 120 mètres de hauteur. Leur méthode consiste, en effet, à déterminer la loi du mouvement de chute par l'étude d'un *graphique* tracé par le corps qui tombe, et indiquant sa position dans l'espace à chaque instant de sa chute.

Le mobile M (fig. 35) est attaché à l'extrémité d'un fil très fin et très léger qui le suit dans son mouvement et ne lui oppose qu'une très faible résistance. Ce fil est partagé en sections de 20 mètres, dont chacune est enroulée sur un cône de bois C, fixé verticalement et la pointe tournée en bas : on conçoit que le fil, entraîné verticalement par la chute du mobile, puisse se dérouler pour ainsi dire sans frottement, à cause de la forme conique de ces bobines. L'expérience commence dès qu'on a coupé le fil vertical de suspension (fig. 35). L'extrémité finale de chaque bobine est engagée dans l'intervalle libre que laissent entre elles les deux branches métalliques P, P d'une sorte de pince. Quand la première bobine C est déroulée, le fil écarte un instant les branches de la pince : à cet ins-

tant précis la plume de l'enregistreur laisse une trace sur le cylindre tournant et la deuxième bobine se déroule à son tour. La deuxième pince s'ouvre après un nouveau déroulement de 20 mètres, et ainsi de suite. On sait donc ainsi les

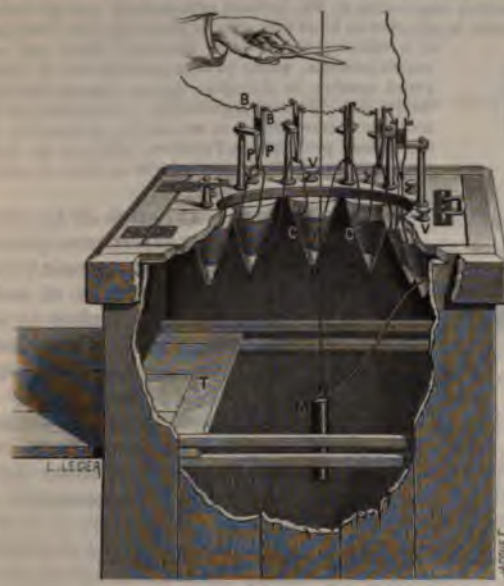


Fig. 35.

emps successifs au bout desquels le mobile a parcouru des espaces de 20 mètres, 40 mètres, 60 mètres, etc.

La figure 36 représente le graphique de plusieurs expériences :

Fig. 36.

1. Tracé théorique de la chute d'un corps tombant librement dans le vide ;
2. Tracé expérimental de la chute d'une *longue flèche en bois*, lestée par une masse métallique *pointue* ;

3. Chute d'un plan carré de $0^{mq},0225$, lesté par une masse de 800 grammes (fig. 37);
4. Chute d'un plan triangulaire de même surface et également lesté.
5. Tracé des vibrations du diapason qui sert à mesurer les temps de chute.

Les premières expériences de MM. Cailletet et Colardeau ont eu surtout pour but de vérifier la précision de leurs appareils, la sûreté de leur fonctionnement et la valeur pratique de la méthode. Elles ont un grand intérêt pratique, parce qu'elles permettront de résoudre un grand nombre de dificultés qui se rencontrent à chaque instant dans diverses applications : résistance de l'air aux trains de chemins de fer et aux navires en marche, direction des ballons, problème de l'aviation, influence du vent sur les constructions, utilisation de la force motrice du vent, etc.

Fig. 37.

50. **Conclusions.** — 1° *Nature de la pesanteur.* — Il résulte de toutes les expériences précédentes que les lois de la chute des corps sont identiques à celles du mouvement rectiligne et uniformément accéléré. Donc, dans les limites où ces lois ont été vérifiées, *la pesanteur*, qui produit la chute des corps, *est une force constante en grandeur et en direction.*

2° *Équations de la chute des corps.* — Les équations générales qui représentent le mouvement uniformément accéléré s'appliquent donc à la chute des corps dans le vide. En appelant g l'accélération de la pesanteur en un lieu donné du globe, on a pour la loi des vitesses

$$[1] \qquad v = gt$$

et pour la loi des espaces

$$[2] \qquad e = \frac{1}{2} g t^2.$$

3° *Formules usuelles.* — I. Si dans l'équation [2] on fait $t = 1$, il vient

$$e = \frac{1}{2} g, \qquad \text{d'où} \qquad g = 2e,$$

c'est-à-dire que *l'accélération due à la pesanteur est égale au double de l'espace parcouru pendant la première seconde de la chute.*

II. Dans l'équation [1], la vitesse v est exprimée en fonction du temps; mais on peut aussi l'exprimer en fonction de l'espace parcouru, en éliminant t entre les équations [1] et [2]. Pour cela, on tire de la première

$$t = \frac{v}{g}, \qquad \text{d'où} \qquad t^2 = \frac{v^2}{g^2}.$$

Portant cette valeur de t^2 dans l'égalité [2], on a

$$e = \frac{1}{2} g \times \frac{v^2}{g^2}, \qquad \text{d'où} \qquad e = \frac{v^2}{2g}.$$

On déduit de là $v^2 = 2ge$ et, en extrayant la racine carrée,

$$[3] \qquad v = \sqrt{2ge}.$$

On voit donc que, *lorsqu'un corps tombe librement dans le vide, la vitesse acquise à un instant donné est proportionnelle à la racine carrée de la hauteur de chute.*

4° *Intensité de la pesanteur.* — On doit définir l'intensité de la pesanteur *l'action qu'elle exerce sur l'unité de masse*, autrement dit *le poids de l'unité de masse.* Or l'équation générale qui lie les forces aux accélérations devient, dans le cas de la pesanteur, $P = Mg$, P étant le poids du corps dont la masse est M, g étant l'accélération de la chute libre dans le vide. Si l'on suppose $M = 1$, on a $P = g$: c'est-à-dire que *l'intensité de la pesanteur est représentée par le même nombre que l'accélération du mouvement qu'elle produit.* C'est pourquoi l'on donne souvent à la constante g le nom d'*intensité de la pesanteur.*

51. **Centre de gravité des corps homogènes.** — La vérification des lois de la chute des corps justifie les définitions que nous avons données précédemment :

1° Du *poids* d'un corps, résultante des forces de la pesanteur, qui sont appliquées à ce corps;

2° Du *centre de gravité*, point d'application de cette résultante.

Le centre de gravité jouit de toutes les propriétés géométriques d'un centre des forces parallèles. Sa position dans le corps ne dépend donc ni de la direction commune des forces parallèles, ni de leur intensité absolue. Par conséquent, elle ne variera point quand on changera l'orientation du corps par rapport à la verticale du lieu, ni quand on transportera le corps dans un autre lieu, d'altitude et de latitude différentes. Elle est déterminée, en général, dans chaque corps par sa forme extérieure et par le mode de répartition de sa masse.

Le cas le plus intéressant à étudier, à ce point de vue, est celui des *corps homogènes.* On dit qu'un corps est *homogène*, quand sa matière est uniformément répartie dans *toute son* étendue, de manière qu'une *portion quelconque du corps ait* une masse proportionnelle *à son volume. D'après l'équation* $P = Mg$, qui lie le

poids à la masse, on voit que le poids d'une portion de corps homogène est également proportionnel à son volume.

Dans tous les corps homogènes, la position du centre de gravité ne dépend que de la figure du corps. Si cette figure est géométrique, la recherche de ce point est un problème de géométrie ou d'analyse, plus ou moins compliqué, mais toujours possible. Si le corps, tout en étant homogène, n'est pas limité par une surface géométrique, son centre de gravité n'en existe pas moins, mais on ne peut le déterminer que d'une manière approchée.

52. **Centre de gravité des solides géométriques.** — 1° *Cas des corps à centre.* — On dit qu'un corps possède un *centre de figure*, ou simplement un *centre*, lorsqu'il existe dans ce corps un point qui divise en parties égales toutes les cordes passant par ce point et limitées à la surface du corps. Tels sont, par exemple, la *sphère*, le *parallélépipède*, le *cylindre circulaire droit*.

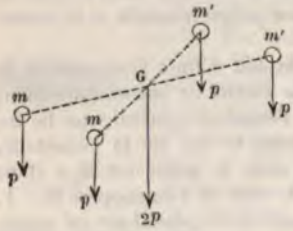


Fig. 38.

On voit tout de suite qu'un pareil corps peut se décomposer en groupes de deux masses, égales et également distantes du centre, telles que m et m' (fig. 38). Ces masses sont sollicitées par leurs poids p, forces égales et parallèles, qui se composent en une force double, $2p$, appliquée au milieu de la ligne mm'. La résultante totale des forces $2p$ correspondantes à chaque groupe sera le *poids total* du corps, et elle sera nécessairement appliquée au même point G : donc le centre de gravité coïncide avec le centre de figure. Ainsi, lorsqu'un corps homogène *a un centre de figure*, ce point est *le centre de gravité*.

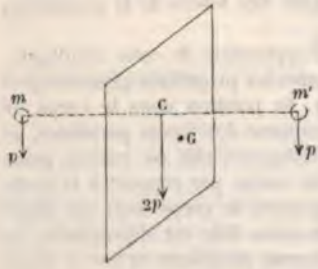


Fig. 39.

2° *Corps à plan diamétral* ou *à plan de symétrie.* — Il est évident que tout corps homogène possédant un plan diamétral ou *un plan de symétrie* peut se décomposer en couples de masses *égales, telles que m et m'* (fig. 39), auxquelles sont appliquées des

forces égales p et p, dont la résultante $2p$ a son point d'application au milieu C de la ligne mm'. Le poids du corps, qui est la résultante totale de toutes ces résultantes partielles, aura nécessairement son point d'application G, qui est le centre de gravité, quelque part dans le même plan. Ainsi, *lorsqu'un corps homogène a un plan diamétral*, ou un *plan de symétrie, le centre de gravité du corps est toujours dans ce plan.*

Exemple. — *Cas d'un tétraèdre. — Le centre de gravité est sur la ligne qui joint l'un des sommets au point de concours des médianes dans la face opposée, et aux trois quarts de cette ligne à partir du sommet.*

En effet, soit le tétraèdre SABC (fig. 40), M et M' les milieux des côtés BC et AC. Le plan SAM est diamétral pour les cordes parallèles à l'arête BC : donc le centre de gravité G est dans ce plan; il est de même dans le plan SBM' qui est diamétral pour les cordes parallèles à l'arête AC : donc il est sur la ligne SO, intersection des deux plans.

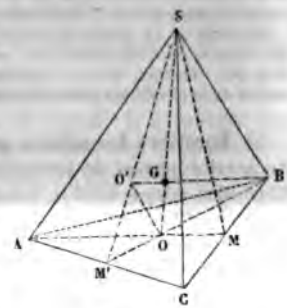


Fig. 40.

Remarquons que cette ligne SO joint le sommet S au point de rencontre O des médianes de la face opposée. Si donc on avait pris le sommet B au lieu du sommet S, on eût démontré de la même manière que le centre de gravité du solide doit se trouver sur la ligne qui joint ce sommet B au point de rencontre O' des médianes de la face opposée : donc il est placé au point G, intersection de ces deux droites. On démontre aisément que la longueur OG est égale à un quart de la longueur SO.

53. **Centre de gravité des surfaces et des lignes.** — On a généralisé la notion, purement physique, de centre de gravité, en l'étendant aux cas, purement géométriques et idéaux, des surfaces et des lignes.

Une surface, qui n'a pas d'épaisseur, et une ligne, qui n'a qu'une seule dimension, ne peuvent pas être pesantes et n'ont pas, à proprement parler, de centre de gravité. Mais on peut concevoir la surface et la ligne partagées, l'une en éléments superficiels, et l'autre en éléments linéaires, auxquels on suppose appliqués des poids proportionnels à leurs dimensions. Ces forces virtuelles ont une résultante égale à leur somme et dont le point d'application est appelé *centre de gravité* de la surface ou de la ligne.

Les principes précédents s'appliquent aux cas des surfaces et des lignes. Ainsi, *pour toute figure plane, douée d'un centre ou d'un diamètre ou d'un axe de symétrie, le centre de gravité est en ce point ou sur cette droite.*

En s'appuyant sur ce lemme préliminaire, on démontre aisément les propositions suivantes :

Le centre de gravité est placé :

Pour une portion de droite, *en son point milieu* ;

Pour une circonférence ou pour un cercle, *en son centre* ;

Pour la surface d'un triangle, *au point de concours de ses médianes* ;

Pour le périmètre d'un triangle, *au point de concours de ses bissectrices* ;

Pour un parallélogramme et pour un rectangle, *au point d'intersection des diagonales*, qui est le *centre de figure*.

Par suite, on trouvera le centre de gravité d'un polygone quelconque en décomposant sa surface en triangles et en parallélogrammes, et celui d'une surface géométrique quelconque en la décomposant en une série d'éléments dont la somme lui soit égale, et en cherchant le point d'application de la résultante de tous ces poids élémentaires.

Remarque. — La notion du centre de gravité des surfaces peut servir à simplifier certains énoncés relatifs aux centres de gravité des corps solides. Ainsi l'on dira, par exemple, que : *Le centre de gravité d'un prisme triangulaire est le milieu de la droite qui joint les centres de gravité des deux bases.*

54. Équilibre des solides pesants. — La considération du centre de gravité permet de formuler simplement les conditions d'équilibre des corps solides pesants[1].

1° *Conditions d'équilibre.* — L'action de la pesanteur sur un corps se réduit toujours à une force unique, verticale, dirigée de haut en bas, et appliquée en son centre de gravité : donc, pour qu'il y ait équilibre, *il faut et il suffit que cette force soit détruite par la résistance d'un point fixe par lequel elle passe.* Par suite, si le corps est suspendu par un point unique ou repose sur un seul point d'appui, le centre de gravité doit se trouver sur la verticale de ce point; si le corps est soutenu par deux points, la verticale du centre de gravité doit rencontrer la droite qui les joint ; si le corps est supporté par plusieurs points, la verticale du centre de gravité doit passer dans l'intérieur du *polygone de sustentation* : on appelle ainsi le polygone qu'on obtient en joignant les points d'appui.

Dans les tours de Pise et de Bologne, qui sont tellement inclinées sur l'horizon qu'elles semblent menacer les passants de leur chute, l'équilibre subsiste, parce que la verticale du centre de gravité de l'édifice passe dans l'intérieur de la base.

Un homme est d'autant plus ferme sur ses pieds que ceux-ci comprennent une base de sustentation plus étendue; car il peut alors donner à ses mouvements plus d'amplitude, sans que la verticale menée par son centre de gravité se trouve en dehors de cette base. S'il se pose sur un pied, sa stabilité diminue ; elle diminue

1. En réalité tous les corps sont pesants, et cette épithète de *pesants* appliquée aux corps solides est un pléonasme; mais il est d'usage de désigner ainsi *les corps lorsqu'on les considère* comme soumis aux *seules* forces de la pesanteur.

encore s'il s'élève sur la pointe du pied. Dans cette position, un très faible balancement suffit pour que son centre de gravité n'ait plus sa verticale au-dessus de la base, et pour lui faire perdre l'équilibre.

2° *Condition de stabilité.* — Selon la position du centre de gravité par rapport aux points d'appui, il se présente trois états d'équilibre : l'état d'*équilibre stable*, celui d'*équilibre instable*, et celui d'*équilibre indifférent*.

L'*équilibre stable* est l'état d'un corps qui, dévié de sa position d'équilibre, y revient de lui-même lorsque aucun obstacle ne s'y oppose. D'une manière générale, *la stabilité est maximum lorsque le centre de gravité du corps est plus bas que dans toute autre position voisine.*

On conçoit en effet que si le corps est alors déplacé, son centre de gravité ne peut être que relevé, et comme la pesanteur tend sans cesse à l'abaisser, elle le ramène, après une série d'oscillations, à sa position première et l'équilibre se rétablit. Tel est le cas d'un balancier d'horloge ou celui d'un œuf posé sur un plan horizontal, lorsque son grand axe est parallèle à ce plan.

On construit de petits appareils où l'on voit se manifester nettement la tendance qu'a le centre de gravité à se placer le plus bas possible. Nous citerons, par exemple, le disque de bois portant latéralement une masse de plomb (fig. 41). Si on le pose sur un plan légèrement incliné, dans une position telle que la verticale du centre de gravité G tombe un peu en avant du point de contact O, on verra le disque remonter le plan incliné, au lieu de descendre plus bas. Il s'arrêtera, pour retomber ensuite lorsque la verticale du centre de gravité G_1 passera par le point de contact O_1. On voit qu'en réalité, pendant l'ascension du disque, son centre de gravité est *descendu* de G en G_1.

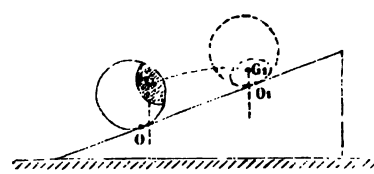


Fig. 41.

L'*équilibre instable* est l'état d'un corps qui, dévié de sa position d'équilibre, ne tend qu'à s'en écarter davantage. Cet état se présente toutes les fois que *le centre de gravité du corps est plus haut que dans toute autre position voisine.*

On voit en effet que, par un déplacement quelconque, le centre de gravité étant abaissé, *la pesanteur ne tend qu'à l'abaisser davantage. Tel est le cas d'un œuf reposant sur un plan horizontal*, de

manière que son grand axe soit vertical, ou celui d'un bâton qu'on fait tenir en équilibre debout sur un doigt.

Enfin, on nomme *équilibre indifférent* celui qui persiste dans

Fig. 42.

toutes les positions que peut prendre un corps. Ce genre d'équilibre se rencontre lorsque, dans les diverses positions du corps, son centre de gravité n'est ni relevé ni abaissé. C'est ce qui a lieu, par exemple, pour une roue de voiture soutenue sur son essieu, ou pour une sphère reposant sur un plan horizontal.

Fig. 43.

Fig. 44.

La figure 42 représente trois cônes, A, B, C, placés respectivement dans les positions d'équilibre stable, instable et indifférent : la lettre *g* y désigne la position du centre de gravité.

55. ***Détermination empirique du centre de gravité des corps solides.*** — *Soit un corps* solide quelconque, homogène ou hété-

rogène. On le suspend à un cordeau, successivement dans deux positions différentes (fig. 43 et 44); puis on cherche le point où le cordeau CD, dans la seconde position, va couper la direction AB, qu'avait le cordeau dans la première : ce point est le centre de gravité cherché. En effet, dans chaque position l'équilibre ne peut s'établir qu'autant que le centre de gravité vient se placer sur la verticale du point d'attache du cordeau; il en résulte que le centre de gravité doit être placé à la fois sur les deux directions du cordeau, et, par conséquent, à leur point d'intersection.

S'il s'agit d'un corps de grande masse, on cherche à le mettre en équilibre sur l'arête d'un fort couteau en acier. Lorsqu'on y est parvenu, le plan vertical passant par cette arête contient nécessairement le centre de gravité. On réalise cet équilibre pour deux autres positions du couteau. Le point unique d'intersection des trois plans verticaux qui correspondent aux trois positions de l'arête du couteau est le centre de gravité.

CHAPITRE III

DÉTERMINATION DE L'INTENSITÉ DE LA PESANTEUR. — PENDULE. EXPÉRIENCES DE BORDA. — APPLICATIONS DU PENDULE.

56. **Procédés divers de détermination de** g. — Nous avons démontré que l'intensité de la Pesanteur est représentée par le même nombre que l'accélération g de la chute des corps dans le vide. Par conséquent, tous les moyens qui nous ont servi à vérifier les lois de la chute des corps pourraient être utilisés pour mesurer g.

Mais ces mesures comportent de nombreuses erreurs, dues aux frottements des organes et à la résistance de l'air, qui enlèveraient toute précision au résultat final. Aussi a-t-on eu recours, pour mesurer g avec exactitude, à une autre méthode, déduite des lois du mouvement pendulaire et fondée sur l'emploi du pendule.

57. **Pendule.** — 1° *Définitions.* — On dit souvent qu'il y a deux sortes de *pendules* : le *pendule simple* et le *pendule composé*. En réalité, il n'existe en physique qu'un seul pendule : c'est le *pendule composé*. Tout corps pesant qui est mobile soit autour d'un point fixe, appelé *centre de suspension*, soit autour d'un axe fixe horizontal, appelé *axe de suspension*, constitue un pendule composé.

D'après cette définition, le pendule peut avoir une forme quel-

conque; on lui donne habituellement celle d'une masse métallique, à surface sphérique ou lenticulaire, soutenue par un fil ou par une tige rigide également métalliques. Un fil à plomb (fig. 15) est l'exemple le plus simple de la première forme : le point d'attache de l'extrémité supérieure du fil est le centre de suspension. Les balanciers d'horloge des figures 21 et 54 représentent les types de pendule les plus usuels. L'axe de suspension est réalisé tantôt par l'arête vive, ou *couteau*, d'un prisme triangulaire en acier, qui est encastré dans la tige du pendule, perpendiculairement à sa longueur (fig. 53), tantôt par une lame d'acier, mince et flexible, qui soutient la tige du pendule et qui se courbe légèrement à chacun de ses mouvements (fig. 58). Toutes les fois qu'on parle de pendule en physique, c'est de l'un de ces appareils qu'il est question.

Quant au *pendule simple* ou *pendule idéal*, ce n'est point un pendule; c'est une conception théorique absolument irréalisable dans la pratique, puisqu'on le définit : un *point matériel pesant*, suspendu, par un fil *inextensible* et *sans poids*, à un point fixe autour duquel il peut se mouvoir librement. Cette conception est utilisée dans l'étude mathématique du *mouvement pendulaire* ou *oscillatoire*.

2° *Mouvement oscillatoire.* — Tout pendule abandonné à lui-même prend, comme un fil à plomb, une position d'équilibre stable : cette position est telle, que la verticale de son centre de gravité rencontre l'axe de suspension.

Imaginons qu'on coupe le pendule par un plan vertical passant par son centre de gravité G et perpendiculaire à son axe de suspension, et prenons cette section pour plan de la figure 45. Le pendule est représenté par la figure plane OG, et son axe de suspension, qui coupe le plan au point O, est représenté par ce point. Dans la position d'équilibre, la verticale du centre de gravité G va passer par le point O, et par suite le poids P du pendule, appliqué en G et dirigé suivant la verticale, est détruit par la résistance du point fixe : il n'a pas de composante horizontale, qui puisse entraîner le pendule dans le sens où il est mobile, c'est-à-dire perpendiculairement à la verticale OG. Menons dans le plan, avec un rayon égal à OG, un arc de cercle $A' HA_1$: si nous dérangeons le pendule de sa position d'équilibre, son centre de gravité se déplacera sur cet arc de cercle, comme un point matériel pesant qui serait assujetti à s'y mouvoir.

Amenons le point G dans la position A_0, de telle manière que la tige du pendule fasse un angle α, égal à HOA_0, avec sa position *initiale. La direction du poids* P ne passant plus par le point fixe,

ce poids peut se décomposer en deux forces : l'une P''_0, dirigée dans le prolongement de la tige, et l'autre P'_0, dirigée suivant la tangente à l'arc HA_0. La composante P''_0 est détruite par la résistance du point fixe; mais la composante tangentielle agit pour entraîner le pendule suivant l'arc A_0 H et pour le ramener vers sa position initiale d'équilibre.

On voit, d'après le rectangle des forces $A_0 P'_0 PP''_0$ (fig. 45), que cette composante P'_0 est égale à P sin α : la force accélératrice est donc proportionnelle au sinus de l'angle d'écart, et elle diminue en même temps que cet angle d'écart. En M, par exemple, lorsque la tige du pendule ne fait plus qu'un angle θ avec la position initiale, on voit, d'après le rectangle des forces, que la composante tangentielle est devenue P'

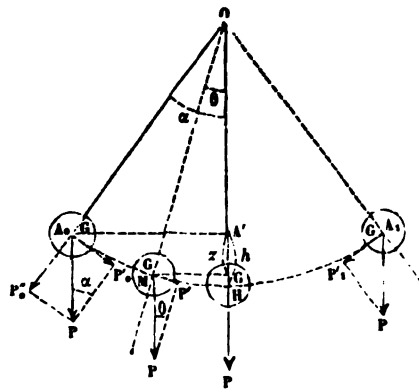


Fig. 45.

et n'est plus égale qu'à P sin θ; cette composante est complètement annulée lorsque le pendule a atteint de nouveau sa position initiale OH.

Mais il ne s'y arrête pas, car il ne se trouve plus du tout dans les conditions initiales. En passant de la position OA_0 à la position OH, il *est tombé* d'une certaine hauteur *h*, qui est égale à la variation de niveau A' H de son centre de gravité. Il a donc acquis en tombant une certaine puissance vive, qui est déterminée par le théorème des forces vives et qui est égale au travail moteur de la pesanteur pendant la chute, c'est-à-dire à P*h*. Le pendule continuera donc son mouvement et dépassera la verticale, entraîné par cette vitesse acquise.

Or, si l'on répète en un point quelconque de l'arc HA_1 la même construction qu'au point M, on constate que la composante tangentielle P'_1 du poids est dirigée en sens inverse du mouvement; la pesanteur agit donc *comme une force retardatrice* pendant *cette deuxième phase du mouvement, et elle enlève* peu à peu au

pendule la vitesse qu'elle lui avait communiquée pendant la descente. Il arrivera donc un moment où la force vive acquise sera complètement annulée par le travail résistant de la pesanteur : le pendule cessera alors de monter, puis retombera immédiatement vers le point H, qu'il dépassera de nouveau, en vertu de sa vitesse acquise, et remontera vers le point A_0 jusqu'à ce que sa force vive soit anéantie. A l'instant de ce nouvel arrêt, le pendule se retrouvera dans les mêmes conditions mécaniques qu'au début, lorsqu'on l'avait écarté pour la première fois de sa position d'équilibre : il aura accompli une première période de son mouvement; et ce mouvement se continuera de la sorte, par une suite plus ou moins longue de périodes analogues qui constituent le *mouvement oscillatoire*.

On nomme *oscillation simple* le passage d'une position extrême du pendule à l'autre position extrême, de part et d'autre de la verticale. La *période* ou *oscillation complète* se compose de la succession de deux oscillations simples, de sens opposés. L'angle $HOA_0 = \alpha$ qui mesure le déplacement angulaire de chacun des points du pendule, s'appelle *amplitude* de l'oscillation.

Remarque. — Si la pesanteur était la seule cause retardatrice du mouvement, comme elle en est la seule cause accélératrice, le point d'arrêt A_1 serait exactement symétrique du point de départ A_0, comme dans le cas théorique du *pendule simple*. En effet, la force vive que le pendule a acquise en tombant de la hauteur h ne pourrait être anéantie qu'à la suite d'une ascension égale à la chute. De même, le pendule s'élèverait jusqu'au point A_0 dans son mouvement de retour, et la période oscillatoire serait constituée par les deux oscillations simples, absolument identiques. Par suite l'amplitude resterait invariable, et le mouvement du pendule, une fois commencé, durerait indéfiniment. Mais il n'en est pas ainsi, parce que deux causes, étrangères à la pesanteur, concourent sans cesse à retarder le mouvement oscillatoire pendant les phases d'ascension : ce sont : 1° la résistance de l'air; 2° le frottement, plus ou moins atténué, mais toujours sensible, qui se produit inévitablement sur l'axe de suspension.

58. **Lois expérimentales du pendule.** — Les lois du mouvement pendulaire proprement dit, trouvées par le calcul, ne peuvent pas s'appliquer rigoureusement au mouvement d'un pendule ordinaire. Il a donc fallu étudier directement celui-ci par l'expérience, qui a conduit aux lois suivantes :

1° Loi du décroissement des amplitudes. — *L'amplitude des oscillations décroît en progression géométrique lorsque leur nombre croît en progression arithmétique.*

Cette loi fut découverte par Borda et vérifiée ensuite par Biot et par plusieurs autres expérimentateurs. Toutes les suivantes ont été découvertes par Galilée, et sont, par conséquent, de beaucoup *antérieures*.

2° Loi de l'isochronisme des petites oscillations. — On peut énoncer cette loi de deux manières :

I. *Les petites oscillations d'un pendule sont isochrones*[1] *quelle qu'en soit l'amplitude;* ou bien, *la durée d'oscillation d'un pendule est indépendante de son amplitude, pourvu que celle-ci soit petite.*

L'un ou l'autre de ces énoncés a la même signification. On a vu que les amplitudes d'un pendule ordinaire, oscillant dans l'air, décroissent d'après la loi précédente. Les durées d'oscillation du pendule commencent nécessairement par décroître aussi, en même temps que ces amplitudes; mais, à partir d'une certaine valeur de l'amplitude (environ 2° ou 3°), la diminution dans la durée n'accompagne plus la diminution dans l'amplitude : celle-ci continuant à décroître, la durée reste constante. Cette durée d'oscillation (pour les petites amplitudes) est donc un caractère spécifique d'un pendule déterminé.

3° Loi des longueurs. — *La durée des oscillations (de faible amplitude) d'un pendule est proportionnelle à la racine carrée de la longueur du pendule.*

Dans cet énoncé, l'expression *longueur du pendule* a le sens particulier, et tout expérimental, que lui donnait Galilée. Il opérait avec des pendules analogues à ceux de la figure 46, constitués tout simplement par une boule sphérique pesante, suspendue à l'aide d'un fil de poids négligeable : la longueur de chaque pendule était la longueur totale du fil de suspension, augmentée du rayon de la boule. On verra plus loin ce qu'il faut entendre exactement par *longueur du pendule.*

4° Loi des substances. — *La durée des oscillations (de faible amplitude) d'un pendule est indépendante de la substance dont il est fait.*

Cela veut dire que des pendules, de même longueur, constitués par des sphères de substances différentes, ont même durée d'oscillation, à partir de l'amplitude pour laquelle l'isochronisme est atteint.

Remarque. — Cette loi n'est pas autre chose, sous une forme nouvelle, que la première loi de la chute des corps, à savoir que la pesanteur agit également sur toutes les substances : d'où il résulte que tous les corps tombent également vite dans le vide.

59. **Vérification expérimentale des lois du pendule.** — On se sert, pour vérifier ces lois, de pendules composés qui se rapprochent autant que possible de ceux que Galilée employa pour les découvrir. Ce sont de petites *sphères, de substance* très dense,

1. *C'est-à-dire de même durée, de* ἴσος, *égal et* χρόνος, temps.

comme le plomb ou le platine, suspendues par des fils très flexibles et très fins dont le poids est négligeable (fig. 46). On prend pour la longueur de ces pendules, comme nous l'avons déjà dit, la distance du centre de la sphère au point de suspension.

Fig. 46.

La méthode générale de vérification est la suivante : On écarte le pendule de la verticale, d'un angle déterminé A qui mesure l'amplitude initiale, et l'on compte la durée totale d'une série de 100 oscillations simples à l'aide d'un chronomètre qui marque le quart de seconde. Cet instrument est muni d'un bouton qu'il suffit de pousser dans un sens ou dans l'autre pour faire partir l'aiguille ou pour l'arrêter. Soit θ la durée totale de la série, et soit A′ l'angle d'écart final ; on prend $\frac{\theta}{100}$ pour durée de l'oscillation et $\frac{A + A'}{2}$ pour amplitude moyenne.

Remarque. — Pour obtenir le nombre des périodes qui correspondent à un certain intervalle de temps, il n'est pas nécessaire de compter tous les passages du pendule par une même position dans un même sens. Il suffit de lire, au chronomètre à pointage, six passages, par exemple, au commencement de l'expérience et six à la fin. Les époques de ces passages font connaître, par leurs différences, la durée moyenne de l'oscillation, ainsi que l'instant final et l'instant initial de l'expérience. Ces deux instants limitent une durée qui comprend un nombre entier de périodes. En divisant donc cette durée par la durée moyenne approchée de la période et prenant le nombre entier N, le plus voisin du quotient obtenu, on a le nombre exact des oscillations effectuées par le pendule dans un temps connu θ. Par suite le quotient $\frac{\theta}{N}$ fait connaître la véritable durée d'une oscillation.

1° *Loi des amplitudes.* — Borda donnait à son pendule une très petite amplitude initiale; elle ne dépassait pas 1/3 de degré. Elle se réduisait aux 2/3 environ de sa valeur après 1800 oscillations.

Biot confirma la loi de Borda pour des amplitudes bien plus grandes. Ainsi, *dans l'une de ses expériences*, l'amplitude initiale était supérieure à 1°; elle *était réduite aux 0,6 environ* de sa valeur après 7000 oscillations.

2° *Loi de l'isochronisme.* — On compte successivement plusieurs séries de

100 oscillations, à partir d'un angle d'écart déterminé. L'amplitude moyenne de ces oscillations décroît peu à peu. En comparant les durées moyennes successives $\frac{\theta}{100}$, $\frac{\theta_1}{100}$..., on constate qu'elles diminuent en même temps que les amplitudes moyennes $\frac{A + A'}{2}$, $\frac{A_1 + A'_1}{2}$..., — tant que celles-ci sont grandes, — mais qu'elles atteignent une valeur constante dès que les amplitudes ne dépassent pas 2 ou 3 degrés.

3° *Loi des longueurs.* — On fait osciller des pendules dont les longueurs sont entre elles comme les nombres 1, 4 (fig. 46). On constate que les durées d'oscillation croissent comme les nombres 1, 2..., c'est-à-dire comme les racines carrées des longueurs.

4° *Loi des substances.* — On suspend à un même support (fig. 46) plusieurs pendules, B, C, D, de même longueur, constitués par des sphères de même diamètre, mais de substances très différentes, par exemple en platine, en fer, ou en verre creux rempli d'eau. On écarte ces trois pendules d'un même angle et on les abandonne au même instant : on voit que leurs oscillations sont indéfiniment concordantes. Ou bien, plus simplement, on mesure leurs durées d'oscillation (pour une petite amplitude) et l'on constate que ces durées sont sensiblement égales, malgré l'influence perturbatrice de l'air.

60. **Comparaison du pendule composé et du pendule simple.** — 1° *Analogie des lois.* — Il n'y a pas d'inconvénients à employer l'expression *pendule simple*, quand on y attache le sens précis indiqué précédemment (57). Elle est même très commode pour énoncer d'une manière concrète les lois du mouvement pendulaire proprement dit, c'est-à-dire du mouvement oscillatoire d'un point matériel pesant M, assujetti à tomber sur un arc de cercle A_0HA_1 (fig. 47), situé dans un plan vertical, et orienté symétriquement par rapport à la verticale Oz du centre du cercle O. La longueur l du pendule simple, c'est le rayon OH ou OA_0 de l'arc, et le centre O du cercle devient le centre de suspension du pendule simple ou la trace de l'axe de suspension sur le plan de la trajectoire.

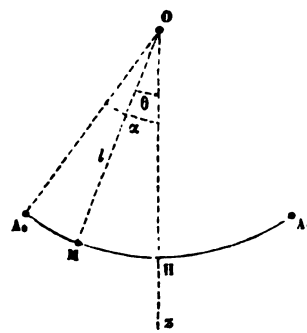


Fig. 47.

Loi de l'isochronisme. — On démontre, en Mécanique rationnelle, que la durée de l'*oscillation simple* du pendule simple est donnée, dans le cas d'une amplitude finie quelconque α, par la formule

$$T = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}\left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2\frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 \sin^4\frac{\alpha}{2} + \dots + \left(\frac{1.3.5\dots 2n-1}{2.4.6\dots 2n}\right)^2 \sin^{2n}\frac{\alpha}{2} + \dots\right].$$

Si nous posons

$$R = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2\frac{\alpha}{2} + \dots + \left(\frac{1.3.5\dots 2n-1}{2.4.6\dots 2n}\right)^2 \sin^{2n}\frac{\alpha}{2} + \dots,$$

nous pourrons écrire

$$T = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}\,(1 + R).$$

La durée d'oscillation du pendule simple, dans le cas d'une amplitude quelconque, est donc exprimée par la somme de deux termes, l'un $\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, qui est constant et indépendant de l'amplitude, et l'autre qui est une fraction du précédent, représentée par une fonction de α. Donc, en réalité, pour le *pendule simple* comme pour le *pendule composé*, *la durée d'oscillation dépend de l'amplitude* et diminue en même temps que l'amplitude.

D'autre part, le terme variable R est une très petite fraction du terme constant. Il est en effet constitué par une série très convergente dont la somme tend rapidement vers zéro quand l'amplitude diminue. Par exemple, si l'on calcule R pour $\alpha = 5°$ et $l = 1$ m., on trouve une fraction au plus égale à 0,0001 : pour une amplitude inférieure à 2°, le terme R serait une fraction complètement négligeable. On peut donc dire que pour le *pendule simple*, non seulement *la durée des petites oscillations est indépendante de l'amplitude*, mais encore que cette durée, pour des amplitudes indéfiniment décroissantes, tend vers une valeur-limite, exprimée par la formule

$$T = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Loi des longueurs. — Il résulte en outre de cette dernière formule que, pour le *pendule simple* comme pour le *pendule composé*, la durée des *petites oscillations* est proportionnelle à la racine carrée de la longueur du pendule.

Lois du décroissement des amplitudes. — Loi des substances. — En admettant que le pendule simple subisse, de la part du milieu où il oscille, une résistance proportionnelle à sa vitesse, on trouve par les calculs que les *amplitudes* des oscillations successives (de faibles amplitudes) obéissent à la loi de Borda.

L'expérience seule peut décider de la loi des substances.

Identité des équations du mouvement. — Cette analogie des lois de la durée d'oscillation pour les deux sortes de pendules se poursuit-elle dans les équations de leurs mouvements ?

Cette analogie se poursuit effectivement, et l'on démontre que *le mouvement oscillatoire d'un pendule composé est identique à celui d'un pendule simple dont la longueur serait égale à* $\frac{I}{Ma}$, en appelant M la masse totale du pendule, I le *moment d'inertie* du pendule composé, et a la distance de son centre de gravité à son axe de suspension[1].

61. Formule du pendule composé. — Longueur du pendule composé, longueur du pendule simple synchrone. — L'une des équations du mouvement oscillatoire donne la durée d'une oscillation simple : on l'appelle communément *formule du pendule.*

1. Le moment d'inertie d'un corps mobile autour d'un axe, pris par rapport à cet axe, n'est pas autre chose que la somme des produits mr^2 des masses m *de chacun* des éléments par le carré de leurs distances r à l'axe, *c'est-à-dire qu'on a* $I = \sum mr^2$ (voir *Mécanique* Maneuvrier et Berget).

Elle est, soit

$$T = \pi\sqrt{\frac{L}{g}}\left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2\frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 \sin^4\frac{\alpha}{2} + \cdots\right]$$

pour les oscillations d'amplitude finie, soit

$$T = \pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

pour les oscillations infiniment petites.

On la prend encore sous une troisième forme, lorsque les oscillations, sans être infiniment petites, sont d'assez faible amplitude pour qu'on puisse négliger toutes les puissances du sinus supérieures à la deuxième et remplacer le sinus par l'arc lui-même. On a alors

$$T = \pi\sqrt{\frac{L}{g}}\left[1 + \frac{\alpha^2}{16}\right].$$

C'est sous cette dernière forme qu'elle a été utilisée par Borda pour la détermination de g.

Dans toutes ces formules, le coefficient L a la valeur $\frac{I}{Ma}$.

Par analogie avec la formule du pendule simple, on donne au coefficient L le nom de *longueur du pendule composé*. On voit que cette longueur représente celle d'un pendule simple qui aurait la même durée d'oscillation que le pendule composé. C'est pourquoi on appelle encore ce coefficient *longueur du pendule simple synchrone*[1] *du pendule composé*.

Remarque. — On peut concevoir sans calculs l'existence nécessaire du pendule simple *synchrone* d'un pendule. En effet, si les divers points matériels qui le constituent étaient isolés, ils décriraient leurs oscillations dans des temps d'autant plus longs qu'ils sont plus éloignés du point de suspension. Or, tous ces points étant invariablement liés entre eux, les durées de leurs oscillations sont nécessairement ramenées à une valeur moyenne commune. Par suite, le mouvement des points les plus rapprochés de l'axe de suspension se trouve retardé, tandis que celui des plus éloignés est accéléré. Entre ces deux positions extrêmes, il y a donc des points qui ne sont ni accélérés, ni retardés, et qui

1. De σύν, avec, et χρόνος, temps, c'est-à-dire qui a des oscillations de même durée.

oscillent comme s'ils n'étaient pas liés au reste du système. Ces points sont équidistants de l'axe de suspension et leur ensemble forme une ligne parallèle à celui-ci, qu'on appelle *axe d'oscillation*. L'un quelconque de ces points matériels constitue évidemment un pendule simple *synchrone* du pendule composé. Tous ces pendules simples ont une même longueur, qui est la distance de l'axe de suspension à l'axe d'oscillation : c'est évidemment la longueur du pendule simple synchrone.

62. **Cinquième loi du pendule. Loi des intensités.** — 1° *Énoncé.* — La formule du pendule, dans le cas des petites oscillations, indique une nouvelle loi, qui avait échappé à Galilée. On peut en donner deux énoncés :

I. *La durée d'oscillation est inversement proportionnelle à la racine carrée de l'intensité de la pesanteur.*

En effet, soient g' et g'' les intensités de la pesanteur dans deux lieux différents où l'on fait osciller successivement le même pendule, on aura, d'après la formule, pour les durées T′ et T″ d'oscillation

$$T' = \pi\sqrt{\frac{L}{g'}} \qquad \text{et} \qquad T'' = \pi\sqrt{\frac{L}{g''}}.$$

En divisant ces deux égalités membre à membre et en simplifiant, on a

$$\frac{T'}{T''} = \frac{\sqrt{g'}}{\sqrt{g'}}.$$

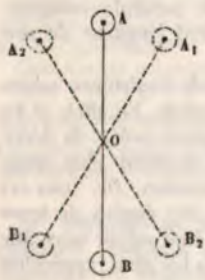


Fig. 48.

II. On déduit de cette équation

$$T'\sqrt{g'} = T''\sqrt{g''} = \text{constante}.$$

Cette équation signifie que, *pour un pendule de longueur donnée, le produit de la durée d'oscillation par la racine carrée de l'intensité de la pesanteur est un nombre constant.*

2° *Vérification expérimentale.* — On se sert d'un artifice expérimental analogue au principe de la machine d'Atwood.

On constitue un pendule composé avec deux fortes masses en plomb, l'une A, d'un poids P, et l'autre B, d'un poids $P + p$, fixées aux extrémités d'une règle de sapin, dont le poids est négligeable. Perpendiculairement à la règle et en son *milieu O, on encastre un* couteau d'acier à arête horizontale, qui sert d'axe de *suspension. On a ainsi un* pendule composé, de longueur sensiblement égale à

OB (fig. 48), et de masse égale à $2M + m$, sollicité par le seul poids p, car la résultante des deux poids P passant par le milieu O du système est constamment annulée par la résistance du support. Par conséquent, l'accélération sera diminuée, comme dans la machine d'Atwood (46, 1°), dans le rapport de

$$\frac{m}{2M + m} \quad \text{ou de} \quad \frac{p}{2P + p}.$$

En prenant P constant et égal à 1 kilogr. par exemple, et donnant à p successivement les valeurs

$$\frac{2}{3}, \ \frac{2}{8}, \ \frac{2}{15} \text{ (de kilogramme)},$$

on aura pour g les valeurs correspondantes

$$\frac{1}{4}g, \ \frac{1}{9}g, \ \frac{1}{16}g.$$

En mesurant les durées T' correspondantes à chaque cas, on constatera qu'elles sont entre elles comme les nombres 2, 3, 4.

65. **Longueur du pendule simple synchrone : autre formule.** — Nous avons vu que la longueur d'un pendule composé, ou, ce qui revient au même, la longueur de son pendule simple synchrone, est donnée par la formule

$$L = \frac{I}{Ma}.$$

Le moment d'inertie I du pendule, qui entre dans cette formule, est pris par rapport à l'axe de suspension. En le remplaçant par le moment d'inertie J, pris par rapport à un axe parallèle à l'axe de suspension et passant par le centre de gravité G du pendule, on donne à la formule précédente une forme plus commode pour les applications.

On démontre, en effet, que l'on a, entre I, J, M et a, la relation

$$I = J + Ma^2$$

ou bien, en adoptant pour J la notation suivante : $J = MK^2$ (K étant une constante),

$$I = M(K^2 + a^2);$$

d'où l'on déduit

$$L = a + \frac{K^2}{a}.$$

Remarques. — 1° La constante K, définie par l'équation $J = MK^2$, s'appelle le *rayon de giration* du pendule.

2° On peut se rendre compte de l'erreur commise dans la vérification des lois expérimentales du pendule composé, lorsqu'on prend pour longueur des pendules sphériques la distance du point de suspension au centre de la sphère. En effet, soit d cette distance et r le rayon de la sphère. En calculant le rayon de giration d'une sphère par rapport à l'un de ses diamètres, on le trouve égal à $\frac{2}{5}r^2$. On a donc, pour la longueur vraie du pendule, c'est-à-dire pour la longueur du pendule simple synchrone,

$$L = d + \frac{2}{5}\frac{r^2}{d}$$

(en négligeant la masse du fil qui soutient la boule). Or, au lieu de cette lon-

gueur L, on prend une longueur $l = d$. L'erreur commise est donc $(L - l)$, c'est-à-dire $\frac{2}{5}\frac{r^2}{d}$. Pour $d = 1^m$ et $r = 25^{mm}$, ce terme correctif est inférieur à $1/4^{mm}$. Il n'est donc pas étonnant que cette faible différence n'influe pas sur la vérification des lois.

64. **Théorème d'Huygens : Réciprocité de l'axe d'oscillation et de l'axe de suspension. — Pendules réversibles.** — 1° *Définitions.* — Soit XX' l'axe de suspension d'un pendule composé (fig. 49) : lorsque le pendule est au repos, le plan vertical passant par XX' contient le centre de gravité G ; par suite, la verticale du point G va couper l'axe XX' en un certain point O. La longueur OG est la distance du centre de gravité à l'axe de suspension : c'est ce que nous avons appelé a. Si, à partir du point G, nous prenons sur le prolongement de OG une longueur GO_1 égale à $\frac{K^2}{a}$, la longueur $OO_1\left(= a + \frac{K^2}{a}\right)$ est la longueur du pendule

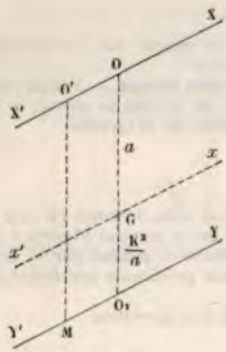


Fig. 49.

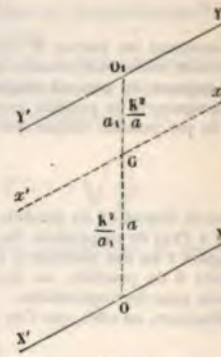


Fig. 50.

composé. Un point matériel placé en O_1 et relié au point fixe O par un fil O_1O, inextensible et sans poids, constituerait un pendule simple synchrone du pendule composé. Les points O_1 et O, qui sont conjugués, s'appellent quelquefois, le premier, *centre d'oscillation*, et le deuxième, *centre de suspension*.

Menons par O_1 une droite YY' parallèle à l'axe XX'. Un point quelconque M de cette droite, étant rejoint à l'axe XX' par une droite MO' parallèle à O_1O, les points conjugués M et O' se trouvent dans les mêmes conditions que les points O_1 et O. En effet, si l'on place en M un point matériel, et qu'on le relie au point fixe O' par un fil inextensible et sans poids, on constituera un pendule simple, ayant une longueur $MO' = O_1O = a + \frac{K^2}{a}$, qui, par suite, sera synchrone du pendule composé. Il en sera de même de tous les points de l'axe YY'. C'est pourquoi l'on appelle cette droite l'*axe d'oscillation* du pendule composé. Nous l'avions déjà définie plus haut (61). Elle jouit d'une propriété qu'a découverte Huygens :

2° Théorème. — *L'axe d'oscillation d'un pendule composé est réciproque de son axe de suspension.*

Cela veut dire que, si l'on suspend le pendule par l'axe YY', de manière que *l'axe d'oscillation devienne l'axe* de suspension, réciproquement l'axe de suspen*sion primitif XX' deviendra* axe d'oscillation (fig. 50) ; autrement dit, le lieu des

pendules simples synchrones du nouveau pendule composé, ainsi constitué, sera précisément l'axe XX'.

3° *Pendules réversibles : Pendules de Bohnenberger, de Kater, de Defforges.* — Cette curieuse propriété a été utilisée pour construire des pendules à deux couteaux qui pouvant servir tour à tour d'axes de suspension : on les appelle *pendules réversibles*.

On a construit trois types de pendules réversibles. Dans le premier type, indiqué par Bohnenberger (fig. 51), l'un des couteaux O est fixe; l'autre est mobile et permet de trouver par tâtonnements la distance pour laquelle les deux pendules inverses sont synchrones. Dans le second type, les deux couteaux sont fixes, mais on peut faire varier la distance verticale du centre de gravité de l'appareil, jusqu'à ce qu'on ait obtenu le synchronisme : c'est le pendule de Kater.

Les deux couteaux en acier, O et O_1 (fig. 52), sont implantés dans une règle de laiton OO_1, qui constitue la tige du pendule; une lourde lentille B constitue le pendule lui-même. La distance des deux couteaux a été réglée d'avance par le constructeur, de manière que la condition de réciprocité soit réalisée à peu près. On la réalise tout à fait à l'aide d'un chariot mobile *Mm* qui se compose de deux pièces M et *m*, de poids très inégaux; la plus lourde, M, peut se fixer sur la tige à l'aide d'une vis de pression; la moins lourde, *m*, est rattachée directement à M à l'aide d'une vis de rappel. Grâce à ce dispositif, on obtient soit de grands déplacements du centre de gravité par le mouvement d'ensemble du chariot, soit de petits déplacements de G par le mouvement relatif de *m* par rapport à M. Enfin le pendule est terminé, à ses deux extrémités, par deux longues aiguilles *t*, *t*, qui facilitent l'application de la méthode des coïncidences (pour la mesure de T et de *g*).

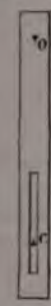


Fig. 51.

Fig. 52.

Enfin, dans un troisième type, récemment employé par le commandant Defforges (fig. 56), les deux couteaux sont *fixes* et *échangeables*, et la tige parfaitement symétrique (67).

65. Application du pendule à la mesure de *g*. — La seule méthode précise pour mesurer l'intensité de la pesanteur est fondée sur l'emploi du pendule; en voici le principe :

Supposons qu'on mesure la durée T des *petites oscillations* d'un pendule. Cette durée est exprimée par la formule-limite du pendule, en fonction des éléments de l'appareil et de l'intensité de la pesanteur. On a

$$[1] \qquad T = \pi\sqrt{\frac{L}{g}}, \quad \text{d'où l'on tire} \quad g = \frac{\pi^2 L}{T^2}. \qquad [2]$$

Il suffira donc d'évaluer L, longueur du pendule simple synchrone du pendule employé. Si L est mesuré en mètres et la durée T en secondes, le nombre g sera rapporté au mètre et à la seconde.

Cette méthode, imaginée et indiquée par Huygens, fut, pour la première fois, appliquée avec succès par Borda. Nous allons exposer les expériences de Borda, qui sont classiques. Nous dirons ensuite quelques mots des anciennes expériences de Kater, ainsi que des expériences toute récentes du commandant Defforges, faites avec des pendules réversibles.

66. **Expériences de Borda.** — 1° *Méthode.* — Borda employa la méthode d'Huygens, mais non la formule-limite du pendule. Il se servit de la formule

$$T = \pi\sqrt{\frac{L}{g}}\left(1 + \frac{\alpha^2}{16}\right),$$

qui représente très exactement la durée d'une oscillation de très faible amplitude, mais non *infiniment petite*. Ses expériences comportaient donc plusieurs mesures de précision :

Mesure de T, durée d'une oscillation simple;

Mesure de L, longueur du pendule simple synchrone du pendule employé ;

Mesure de α, amplitude des oscillations dont il mesurait la durée.

Fig. 53.

2° *Description du pendule de Borda.* — L'appareil se compose de deux parties bien distinctes : le pendule proprement dit, A, et le couteau de suspension B (fig. 53).

A. Le pendule proprement dit est formé d'une lourde sphère en platine (d'environ 36 millimètres 1/2 de diamètre), soutenue par un fil métallique très fin. (Le fil de Borda était en fer; Biot y substitua un fil en cuivre, pour le soustraire à l'influence magnétique de la terre.) Le fil y était fixé par l'intermédiaire d'une calotte métallique très mince *cc*, s'adaptant exactement sur la surface sphérique : le simple contact des deux surfaces, préalablement enduites d'une mince couche de suif, suffit pour en maintenir l'adhérence, et la masse du pendule se trouve ainsi suspendue au fil.

B. L'autre extrémité du fil est attachée à un *couteau de suspension* B, pareil à celui des horloges. C'est une pièce cylindrique en métal, dans laquelle est *encastrée, perpendiculairement* à sa longueur, un prisme triangulaire en acier. *L'axe de suspension est réalisé* par l'arête horizontale dd du prisme, reposant

sur deux plans fixes, bien polis, de pierre très dure ou d'acier, et parfaitement

Fig. 54.

horizontaux. Ces plans étaient eux-*mêmes enchâssés dans un* grand plateau de

fer, attaché à des supports qu'on avait scellés dans une muraille solide (fig. 54).

3° *Mesure de la durée d'une oscillation. — Méthode des coïncidences.* — On pourrait employer le procédé que nous avons exposé ci-dessus (59) pour la vérification des lois du pendule. Borda employa une autre méthode de mesure, qui est la *méthode des coïncidences*, imaginée par de Mairan.

Principe de la méthode. — On dispose le pendule devant le balancier d'une horloge à secondes (fig. 54), de telle manière que : 1° pendant la marche des deux pendules, leurs plans d'oscillation soient parallèles ; — 2° à l'état d'équilibre, les verticales de leurs centres de gravité se trouvent dans un même plan vertical, perpendiculaire au plan d'oscillation.

Supposons les deux pendules réduits à ces deux verticales (fig. 55). A l'état de repos, le pendule P_0 se projette exactement sur le balancier B_0, pour un observateur qui regarde dans l'azimut Ox. Il en est absolument de même lorsque, pendant leur mouvement, les deux pendules passent, au même instant, soit dans le même sens, soit en sens contraire, par l'azimut Oz : on dit qu'il se produit *une coïncidence*, lorsque les deux pendules se superposent ainsi, *en marchant dans le même sens.*

Fig. 55.

Supposons qu'on observe leurs mouvements simultanés à partir de l'instant d'une coïncidence, et que le pendule P_0 marche un peu plus vite que le balancier. Celui-ci décrit d'abord l'arc B_0A_1, dans le sens indiqué par la flèche, puis l'arc A_1B_0, en sens contraire, et passe par la verticale, au bout de 1 seconde, avec une vitesse égale et opposée à sa vitesse de départ ; puis il décrit l'arc B_0A_0, revient de A_0 en B_0, et repasse par la verticale au bout de 2 secondes, avec la même vitesse et dans le même sens qu'au début. Pendant le même temps, le pendule P_0 aura également décrit, deux fois en sens contraire, l'arc P_0a_1, puis l'arc P_0a_0 ; mais, comme il va *un peu plus vite* que le balancier, il aura repassé à la verticale plus tôt que celui-ci, et il sera en P_1 à l'instant précis où le balancier sera en B_0 : il aura donc exécuté deux oscillations simples, *plus* un arc P_0P_1 : cet arc est proportionnel à l'excès de la vitesse du pendule sur celle du balancier, et mesure l'avance du premier sur le deuxième. De même, au bout de deux autres secondes, quand le balancier passera de nouveau par sa position initiale, le pendule ne sera ni en P_0 ni en P_1, il sera arrivé en P_2, à une distance de la verticale P_2P_0 qui est égale à deux fois l'avance P_0P_1. Et, ainsi de suite, entre deux passages consécutifs du balancier par la verticale, le pendule exécutera deux oscillations simples, *plus une avance constante*, qui s'ajoutera aux avances précédentes. La somme de ces avances successives (qui constitue l'écart du pendule à l'instant du passage) s'accroîtra donc proportionnellement au temps et la coïncidence ne pourra plus se réaliser que lorsque la somme des arcs $(P_0P_1 + P_1P_2 + \ldots)$ sera exactement égale à $(P_0a_1 + a_1P_0 + P_0a_0 + a_0P_0)$, c'est-à-dire deux fois l'amplitude totale du pendule. La condition nécessaire et suffisante pour qu'il y ait une première coïncidence est donc

$$[1] \qquad \Sigma\,(\text{arc } P_0P_1) = 2\,(\text{arc } a_0a_1).$$

A l'instant de cette coïncidence, le pendule P aura nécessairement exécuté *deux oscillations simples de plus que le balancier*. La conséquence de la coïncidence, c'est donc que

$$[2] \qquad n = N + 2,$$

en appelant N le nombre des secondes marquées par le balancier dans l'intervalle des deux coïncidences, et n le nombre correspondant des oscillations simples du pendule. Les équations [1] et [2] résument toute la méthode.

Remarques. — I. On voit que la coïncidence ne sera *mathématiquement* réalisable que si l'avance P_0P_1 est exactement une partie aliquote de l'amplitude α; mais, pour qu'elle se réalise pratiquement, il suffira que l'avance soit très petite par rapport à l'amplitude α, c'est-à-dire qu'il y ait une très faible différence, comme nous l'avons supposé ci-dessus, entre les deux durées d'oscillation.

II. Si le pendule avait un retard, au lieu d'une avance, sur le balancier, il n'y aurait rien à changer aux raisonnements précédents, si ce n'est le signe de P_0P_1, et par suite la formule finale, qui deviendrait évidemment

$$n = N - 2.$$

C. *Opération*. — Les deux verticales étaient réalisées, dans la pratique, l'une par le fil même de suspension du pendule, et l'autre par un trait noir vertical, tracé sur un carré de papier blanc, qu'on collait symétriquement à la surface du balancier (fig. 54). On observait les coïncidences à l'aide d'une lunette immobile, placée à 10 mètres de distance, et orientée de manière que le trait vertical du balancier fût exactement caché par le fil du pendule, dans la position d'équilibre. Enfin, les deux appareils étaient enfermés dans une cage vitrée, qui les préservait des agitations de l'air extérieur, ainsi que des variations de température. Plus tard, Biot entoura l'horloge elle-même d'une *deuxième cage en verre*, intérieure à l'autre, parce qu'il avait remarqué que le mouvement du balancier influençait le pendule par l'intermédiaire de l'air.

L'opération est des plus simples. Il suffit de lâcher le pendule à un instant, qu'on note sur l'horloge, puis d'attendre tranquillement la production de deux coïncidences successives. Soit N le nombre de secondes, marqué par l'horloge, qui s'est écoulé entre les deux instants, on a, d'après la formule précédente, $n = N \pm 2$, d'où l'on déduit, pour la durée d'une seule oscillation simple, $T = \frac{N}{n}$.

Remarques. — I. On comprend sans peine que l'observateur n'ait pas besoin de rester l'œil à la lunette pendant tout l'intervalle de temps qui sépare deux coïncidences. La connaissance approximative de la durée d'oscillation du pendule lui permet de prévoir l'époque de la coïncidence : il n'a besoin d'observer qu'un peu auparavant.

II. Si l'on se trompe d'une oscillation sur l'instant de la coïncidence, il n'en résulte qu'une faible erreur. On peut s'en convaincre en faisant N successivement égal à 1000, puis à 1001 dans la formule précédente : on en tire pour T les valeurs 0,998014 et 0,998016, qui ne diffèrent entre elles qu'à la sixième décimale. Cet exemple numérique montre quel est le degré de précision de la méthode.

4° *Mesure des amplitudes des oscillations*. — *Méthode*. — L'opération précédente donne, non pas la durée d'une oscillation particulière, mais la *durée moyenne* correspondante à n oscillations consécutives.

Si les oscillations étaient très petites, *il n'y aurait pas à se* préoccuper de leur amplitude, *puisque leur durée en serait indépendante*. Mais, en réalité, *les amplitudes décroissent d'une manière continue* d'après la loi même décou-

verte par Borda (58, 1°). Toutefois, si la durée de l'expérience est très courte, on peut admettre que les amplitudes successives $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \ldots, \alpha_n$ sont peu différentes chacune de l'amplitude moyenne obtenue en prenant la demi-somme des amplitudes extrêmes $\frac{\alpha_n + \alpha_1}{2}$. Il suffira donc de porter cette valeur de α dans la formule, et l'on aura alors

$$T = \pi \sqrt{\frac{L}{g}} \left[1 + \frac{(\alpha_1 + \alpha_n)^2}{32} \right].$$

Opération. — Elle se réduit alors à mesurer deux amplitudes. Il n'est pas absolument nécessaire de choisir la première et la dernière, ainsi que la formule l'indique; la décroissance des amplitudes s'effectue par degrés si peu sensibles, qu'il suffit amplement de mesurer l'une des premières pour α_1, l'une des dernières pour α_n. Pour cela, on dispose derrière le pendule B (fig. 68) une échelle horizontale divisée en parties égales, à une distance connue du centre de suspension. On observe alors sur cette échelle les positions extrêmes du pendule à un instant donné, et l'on en déduit par un calcul très simple la valeur de l'angle α correspondante à cette oscillation. — C'est *cette valeur d'angle*, et non *l'amplitude elle-même*, qui entre dans les formules précédentes.

5° *Mesure de la longueur du pendule.* — Il ne reste plus qu'à mesurer la longueur du pendule composé, c'est-à-dire la longueur du pendule simple synchrone que représente le coefficient L dans la formule de T.

On a vu que cette longueur L est liée aux éléments géométriques du pendule par la formule

$$L = a + \frac{K^2}{a},$$

dans laquelle a représente la distance du centre de gravité du pendule à l'axe de suspension et K^2 son rayon de giration, calculé par rapport à un axe passant par le centre de gravité.

Mesure de a. — Si nous supposons le pendule réduit à la partie que nous avons désignée par B, c'est-à-dire à la sphère de platine, à la calotte qui l'emboîte et au fil de suspension, la mesure de a est très simple. Le centre de gravité du système coïncidant sensiblement avec le centre de la sphère, il suffira de déterminer : d'abord la distance verticale de l'axe de suspension à l'extrémité inférieure du diamètre vertical de la sphère. Cette distance d est égale à la longueur λ du fil, augmentée du diamètre $2r$ de la sphère. On a

$$[1] \qquad d = \lambda + 2r;$$

puis la distance de l'axe de suspension à l'extrémité supérieure du diamètre vertical de la sphère. On a évidemment

$$[2] \qquad d = \lambda.$$

On déduira de ces deux lectures $d - d' = 2r$, c'est-à-dire le diamètre de la sphère et

$$d - \frac{d - d'}{2} = \lambda + r = a.$$

Ces deux mesures se faisaient à l'aide d'un petit instrument de précision, *ayant pour organe* principal ce qu'on appelle une *vis micrométrique* (fig. 68). *Nous le décrirons* plus tard (84) comme application de la vis micrométrique.

Calcul du moment d'inertie. — Si l'on suppose toujours le pendule P réduit à la partie B (sphère, calotte et fil), son moment d'inertie se compose de celui de la sphère augmenté de celui de la calotte et de celui du fil.

On sait que K^2, carré du rayon de giration d'une sphère de rayon r, pris par rapport à l'un quelconque de ses diamètres, est égal à $\frac{2}{5}r^2$. On a donc (en négligeant les rayons de giration du fil et de la calotte),

$$MK^2 = M\frac{2}{5}r^2, \qquad \text{d'où} \qquad K^2 = \frac{2}{5}r^2.$$

Longueur du pendule simple synchrone. — On a donc enfin, en réunissant toutes les mesures précédentes,

$$L = a + \frac{K^2}{a} = \lambda + r + \frac{\frac{2}{5}r^2}{\lambda + r}.$$

6° *Justification de ces opérations.* — I. En réalité le pendule se compose non seulement de la partie B, mais aussi de la partie A qui est le couteau de suspension; mais Borda avait réussi à éliminer l'influence de cette dernière au moyen d'un procédé très ingénieux. En déplaçant un écrou sur une vis verticale qu'on voit (fig. 53) au-dessus de B, il réglait la position du centre de gravité du couteau, de manière que celui-ci constituât un pendule composé, *ayant la même durée d'oscillation* que le pendule complet. Dans ces conditions, *le couteau n'a pas d'influence sur le mouvement du pendule complet :* tout se passe comme si celui-ci était réduit à la partie B, c'est-à-dire à la sphère, à la calotte et au fil.

II. Borda démontra ce fait expérimentalement. Il effectuait la mesure de n en employant successivement deux couteaux de poids très différents, mais réglés de manière à osciller seuls, synchroniquement avec le pendule total : il trouvait des nombres identiques dans les deux cas.

7° *Causes d'erreur dans les expériences de Borda. — Corrections.* — Parmi ces causes d'erreur, les unes sont particulières et inhérentes aux procédés mêmes employés par Borda, les autres sont générales et résultent de l'emploi même du pendule.

Celles-ci sont de beaucoup les plus importantes. Ce sont : 1° l'influence de l'air : perte de poids du pendule en marche et obstacle à son mouvement par résistance et par viscosité; 2° l'influence des supports, qui enlèvent aussi au pendule une partie de sa force vive, par suite des vibrations que ses oscillations leur communiquent.

Quant aux causes d'erreur particulières, nous avons déjà signalé les principales : emploi d'un fil de suspension magnétique, influence réciproque des deux pendules par l'intermédiaire de l'air de la cage, difficulté de saisir l'instant précis des coïncidences, etc.

MM. Célérier et Pierce ont établi, en 1880, des formules de correction très pratiques, qui tiennent compte de la *poussée de l'air*, de *son entraînement* et de *sa viscosité*, ainsi que de l'*ébranlement des piliers*. Mais la correction la plus sûre consiste à prévenir les erreurs : c'est ce qu'a fait récemment M. le commandant Defforges, dans une série d'expériences entreprises pour le service géographique de l'armée.

67. **Expériences du commandant Defforges. — Pendule réversible et à couteaux échangeables.** — Dès 1849, on fut conduit à la conception d'un pendule parfaitement symétrique et muni de deux couteaux *échangeables*, et dont les arêtes soient à très *peu près des axes réciproques*. Un tel pendule permet d'éliminer *plusieurs erreurs : 1° par la réversion*, l'erreur de la position du centre

d'oscillation; 2° par la *symétrie de sa forme*, l'effet total du milieu ambiant; 3° par l'*échange des couteaux*, l'influence de la courbure de leurs arêtes. Cette élimination exige d'ailleurs *expressément* que toutes les oscillations soient effectuées dans les mêmes limites d'amplitude.

Fig. 56.

Le commandant Defforges a fait construire par les frères Brünner des pendules de ce genre pour ses expériences. Ils sont formés d'un tube creux en laiton (fig. 56) de 1 mètre de longueur, de 30 millimètres de diamètre et de 3 millimètres d'épaisseur, terminé par deux demi-sphères munies chacune d'une pointe cylindro-conique. L'appareil complet comprend deux pendules de même poids, pouvant osciller successivement autour des mêmes couteaux et dont les arêtes sont distantes de 50 centimètres. Ces deux pendules ont des longueurs égales à 1 mètre et 1m,42, et leurs centres de gravité sont semblablement disposés, de telle sorte que l'on a

$$\frac{a}{a_1} = \frac{a'}{a'_1}.$$

L'emploi de ces deux pendules ainsi établis permet d'éliminer, par une combinaison convenable de leur durée d'oscillation théorique, les causes d'erreur ci-dessus énumérées, y compris l'effet de l'ébranlement des supports.

68. Résultats des diverses mesures de g à Paris. — Les résultats de toutes ces expériences se présentent habituellement sous deux formes :

1° Sous la forme directe de g, c'est-à-dire de l'accélération cherchée.

2° Sous la forme d'une certaine grandeur liée à la valeur de g par une relation très simple et qu'on appelle *longueur du pendule qui bat la seconde*. C'est la longueur du pendule simple synchrone d'un pendule composé qui aurait précisément pour durée d'oscillation 1 *seconde* ; cette grandeur est évidemment donnée par la formule du pendule, où l'on fait $T = 1^s$. On a

$$1 = \pi\sqrt{\frac{L_1}{g}}, \qquad \text{d'où} \qquad L_1 = \frac{g}{\pi^2}.$$

Cette grandeur, étant proportionnelle à g, peut servir à représenter g.

Les expériences faites par Borda à l'Observatoire de Paris (incomplètement corrigées de la poussée de l'air) ont donné :

$$L_1 = 99^{cm},5827.$$
$$g = 980\ ,882.$$

Ces nombres, après avoir subi la correction complète, effectuée par M. Pierce, sont devenus :

$$L_1 = 99,5912 \text{ cm.}$$
$$g = 980,9696,$$

à l'altitude moyenne de 67 m., et sous la latitude de Paris.

Le commandant Defforges a trouvé au Bureau international des poids et mesures (longit. O. = 0,151 *grade*; lat. N. = 54,26 gr.; altit. = 70,4 m.) (le grade est la centième partie du quadrant) :

$$L_1 = 99,5952 \text{ cm.}$$
$$g = 980,991.$$

69. **Variations de g et de L à la surface du globe.** — Tous ces nombres ne peuvent servir que pour l'altitude et la latitude où ils ont été déterminés. Les expériences des divers expérimentateurs ont, en effet, prouvé que la valeur de g et, par suite, celle de L_1 varient suivant les différents lieux où on les a déterminées, et qu'elles sont fonctions de deux variables : la hauteur verticale au-dessus du niveau de la mer (*altitude*), et la distance à l'équateur, comptée sur le méridien (*latitude*).

On peut d'ailleurs calculer par une formule générale soit l'intensité de la pesanteur, soit la longueur du pendule à secondes dans un lieu dont on connaît l'altitude z en mètres et la latitude λ. On a

$$g = g_{45,0}(1 - 0,00259 \cos 2\lambda)(1 - 0,000\,000\,196\,z),$$
$$L_1 = L_{45,0}(1 - 0,00259 \cos 2\lambda)(1 - 0,000\,000\,196\,z).$$

Les nombres 980,65 et 99,557 cm représentent les valeurs $g_{45,0}$ et $L_{45,0}$ à la latitude 45° et au niveau de la mer.

Remarque. — D'après ces formules, on calcule que le *poids absolu* de 1 kilogramme augmente à peu près de 5 grammes quand on passe de l'équateur au pôle, et que la *longueur du pendule à secondes* augmente, dans les mêmes conditions, d'environ 5 millimètres.

70. **Variations de g à l'intérieur du globe.** — La loi de variation n'est plus la même lorsque, au lieu de s'élever au-dessus de la surface du globe, on pénètre dans l'intérieur. D'un côté, *en admettant* l'identité de l'attraction universelle et de la pesanteur, on trouve, *par le calcul*, que l'attraction terrestre *doit croître proportionnellement à la distance au centre*; par conséquent, le nombre g, qui mesure cette attraction, doit *diminuer* à mesure qu'on pénètre à de plus grandes profondeurs. D'autre part, une expérience faite par M. Airy, avec la méthode du pendule, a prouvé que *g commence par croître* quand on s'enfonce dans la terre : ainsi, à la profondeur de 583 mètres, l'accroissement est de $\frac{1}{1020}$ de la valeur à la surface.

Cette contradiction apparente entre la théorie et l'observation a été expliquée par un calcul de M. Roche. En admettant que la croûte terrestre soit constituée par des couches concentriques homogènes, mais de densités croissantes, et que l'accroissement de densité soit proportionnel au carré de la distance au centre, M. Roche trouve, en effet, que :

1° La pesanteur doit croître dans l'intérieur du globe jusqu'à une profondeur égale à 1/6 du rayon terrestre et qu'on a à cette profondeur

$$g' = \frac{16}{15} g.$$

2° La pesanteur doit, à partir de cette profondeur, décroître d'une manière continue. C'est à la profondeur de 1/3 du rayon terrestre que son intensité reprend la même valeur qu'à la surface.

Comme les mines les plus profondes ne descendent guère au delà de 1 kilomètre, les résultats de ce calcul ne sont pas susceptibles d'une vérification directe. Il faut donc se contenter des expériences de M. Airy, dont les résultats sont d'ailleurs en parfaite concordance avec les calculs de M. Roche.

71. Origine de la pesanteur : elle est un cas particulier de l'attraction universelle. — La force de la pesanteur n'est pas autre chose que l'attraction planétaire exercée par la Terre sur les corps de petites dimensions placés à sa surface et elle suit les mêmes lois que cette attraction. En effet, s'il en était ainsi, l'attraction terrestre serait la même que si toute la masse de la Terre — supposée sphérique et homogène ou formée de couches concentriques homogènes — était condensée en son centre. En appelant f son action totale sur un corps de masse m, M la masse totale de la Terre, R son rayon et z l'altitude du corps, on aurait

$$[1] \qquad f = \varphi \cdot \frac{Mm}{(R+z)^2}$$

et pour l'accélération de cette force

$$[2] \qquad \gamma = \frac{f}{m} = \varphi \frac{M}{(R+z)^2}.$$

Comparons ces deux quantités f et γ, qui caractériseraient l'attraction terrestre au poids P du corps et à l'accélération g qui caractérisent la pesanteur.

1° *Direction des deux forces.* — La force f est dirigée vers le centre du sphéroïde terrestre. Or nous avons démontré que la direction de la pesanteur, autrement dit *la verticale*, étant normale à la surface des eaux tranquilles, va sensiblement passer au centre de la Terre : donc la direction de l'attraction est la même que celle du poids.

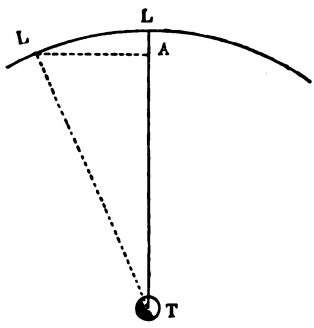


Fig. 57.

2° *Intensité des deux forces.* — L'intensité de l'*attraction terrestre* est représentée, comme pour la pesanteur, par l'accélération du mouvement qu'elle imprime aux corps attirés. On voit d'abord que cette accélération, donnée par la formule [2], est indépendante de la masse m du corps attiré. Or nous avons démontré qu'il en est de même pour l'accélération de la pesanteur, puisque *tous les corps tombent, dans le vide, avec la même rapidité.*

La formule [2] prouve en outre que l'intensité de l'attraction terrestre varie en raison inverse du carré de la distance du corps attiré au centre de la Terre. Or les altitudes dont on dispose à la surface du globe sont trop petites, par rapport au rayon terrestre, pour qu'on ait pu vérifier directement, même par l'excellente méthode du pendule, si l'intensité de la pesanteur, c'est-à-dire g, varie d'après la même loi. Mais si, comme l'a fait Newton, on

considère la révolution mensuelle de la Lune autour de la Terre comme le mouvement d'un corps pesant qui tombe vers la Terre par l'effet de la pesanteur, il sera possible de faire cette vérification.

Si L est la position de la Lune sur son orbite au temps t (fig. 57) et L' sa position au temps t', on peut admettre que le satellite est tombé vers la Terre de la hauteur LA pendant l'intervalle de temps $(t' - t)$. L'accélération γ de cette chute, c'est précisément la valeur que prend l'intensité g de la pesanteur à la distance où est la Lune. Si la loi de l'attraction s'applique à la pesanteur, on doit avoir

$$\frac{\gamma}{g} = \frac{R^2}{(R+z)^2}.$$

Ici $R + z$ est égal à la distance des centres de la Lune et de la Terre, c'est-à-dire à 60 rayons terrestres. On a donc

$$\left(\frac{R}{R+z}\right)^2 = \left(\frac{1}{60}\right)^2 = \frac{1}{3600},$$

et par suite

$$\gamma = \frac{1}{3600} g = \frac{9^m,8}{3600} = 0^m,00272.$$

Or on peut calculer directement γ en fonction des éléments du mouvement de la Lune sur son orbite. En effet, si nous supposons, comme l'a fait Newton, que ce mouvement est circulaire et uniforme, l'accélération γ n'est pas autre chose que l'*accélération centripète* définie par la formule $\frac{V^2}{\rho}$, V étant la vitesse du mouvement circulaire et ρ le rayon de l'orbite. Or, d'une part, ρ est égal à la distance de la Lune à la Terre, c'est-à-dire à 60 R ou $60 \times 6\,360\,000$ mètres. D'autre part, on peut calculer aisément V en divisant la circonférence que décrit le centre de la Lune par la durée d'une révolution : on a

$$V = \frac{2\pi\rho}{T} = \frac{2\pi \,.\, 6\,360\,000^m \times 60}{27^j\ 7^h\ 43^m\ 4^s}.$$

En convertissant T en secondes, on trouve environ $V = 1020$ mètres. On a donc enfin

$$\gamma = \frac{1020^2}{60 \times 6\,360\,000} = 0{,}00272.$$

On voit qu'on trouve pour γ le même nombre que précédemment, jusqu'à la cinquième décimale. La pesanteur suit donc la même loi de variation avec la distance que l'attraction terrestre : d'où il résulte que ces deux forces sont identiques en intensité comme en direction, et, par suite, que la pesanteur n'est pas autre chose que l'*attraction planétaire* de la Terre, c'est-à-dire un cas particulier de l'*attraction universelle*.

72. **Diverses applications du pendule composé.** — Parmi les principales applications du pendule, nous citerons :

La régulation des horloges, par Huygens;

La mesure de l'intensité d'une force quelconque, constante en grandeur et en direction.

1° *Régulation des horloges.* — *C'est Huygens* qui eut le pre-

mier l'idée d'appliquer l'isochronisme des petites oscillations du pendule à la régulation du mouvement des horloges[1].

La tige du pendule régulateur (fig. 58) s'engage dans une fourchette *a* destinée à transmettre le mouvement à une seconde tige *b*, laquelle est liée à un axe horizontal O. A cet axe est fixée une pièce *mn*, qu'on nomme *échappement à ancre* à cause de sa forme, et qui se termine à ses extrémités par deux palettes alternativement en prise avec les dents d'une roue R, qui est dite la *roue de rencontre*, ou encore *roue à rochet*, ou *roue d'échappement*. Cette roue, sollicitée par le moteur qui fait marcher l'horloge, tend à prendre un mouvement de rotation continu dans le sens marqué par la flèche. Si le pendule est au repos, la roue est arrêtée par la palette *m*, et, avec elle, tout le mouvement d'horlogerie. Au contraire, si le pendule oscille et prend la position indiquée en ligne ponctuée, la dent qui butait contre la palette *échappe*, et la roue tourne, mais d'une demi-dent seulement, parce que, l'arc *mn* inclinant en sens contraire, la palette *n* vient à son tour arrêter une dent. Puis, à l'oscillation suivante, cette dent échappe, et c'est la palette *m* qui arrête alors la dent qui vient après celle qu'elle arrêtait d'abord, et ainsi de suite : en sorte qu'à chaque oscillation double du pendule, la roue de rencontre avance d'une dent. Or les oscillations du pendule ont une faible amplitude et sont isochrones ; par suite, la roue de rencontre et le mécanisme de l'horloge, qui en est solidaire, marchent et s'arrêtent à des intervalles égaux, et marquent des divisions égales du temps.

Fig. 58.

2° *Mesure de l'intensité des forces constantes.* — Imaginons un corps mobile autour d'un axe, mais soustrait à l'action de la pesanteur : tel serait un corps pesant assujetti à tourner autour d'un axe *vertical*. Supposons qu'on soumette ce corps à l'action d'un système de forces parallèles (F, F', F''), de grandeur constante, toutes perpendiculaires à l'axe de rotation. Par rapport à ces forces, le corps est dans la même situation qu'un pendule composé par rapport aux

1. *En 1657*; quelques années plus tard, en 1665, il appliqua le *ressort spiral à la régulation des montres.*

forces de la pesanteur; en un mot, le corps est un *pendule composé* par rapport au système de forces parallèles. Le système (F, F', F'',...) a une résultante R égale à la somme (F + F'...) et appliquée au centre des forces parallèles; si le corps est orienté de manière que la résultante R aille rencontrer l'axe, le corps restera en *équilibre*; si le corps est écarté de cette position d'équilibre, il prendra immédiatement un mouvement pendulaire, identique à celui du pendule composé, et représenté par les mêmes équations. La durée des petites oscillations sera donnée par la même formule-limite

$$T = \pi\sqrt{\frac{I}{M\gamma a}},$$

dans laquelle I représentera le moment d'inertie du corps (calculé par rapport à l'axe de rotation), M la masse totale du corps, γ l'accélération due à la force constante et a la distance de son point d'application (centre des forces parallèles) à l'axe de rotation. En posant $M\gamma = R$, on a

$$T = \pi\sqrt{\frac{I}{Ra}}.$$

C'est la formule générale de la méthode des oscillations. Elle permet de déterminer l'intensité R d'une force constante, en grandeur et en direction, en faisant osciller, sous l'action de cette force, un pendule composé, *non pesant* (c'est-à-dire soustrait à l'action de la pesanteur), et dont l'axe de suspension est perpendiculaire à la direction de la force constante.

Remarque. — Si la force constante n'était pas perpendiculaire à l'axe de suspension, on pourrait la décomposer en deux autres forces R' et R'', l'une perpendiculaire à l'axe, et l'autre parallèle à l'axe : cette dernière n'ayant aucun effet sur le mouvement oscillatoire, c'est l'intensité R' de l'autre composante qui entrerait seule dans la formule précédente. On aurait

$$T = \pi\sqrt{\frac{I}{R'a}} \qquad \text{et} \qquad R' = R\sin\beta,$$

β étant l'angle de la direction de la force constante avec la direction de l'axe de rotation.

CHAPITRE IV

MESURE DES GRANDEURS MÉCANIQUES ET PHYSIQUES. — SYSTÈME DES UNITÉS ABSOLUES OU SYSTÈME C. G. S. — INSTRUMENTS DE PRÉCISION.

75. Définitions générales. — 1° *Unités de mesure, valeur numérique.* — *Mesurer une grandeur*, c'est la comparer à une certaine grandeur de même espèce, qu'on appelle *unité de mesure* ou, simplement, *unité*. Le résultat de cette opération se nomme la *valeur numérique* ou, simplement, la *valeur* de la grandeur mesurée : c'est un *nombre abstrait*, qui exprime combien de fois cette grandeur contient l'unité ou une partie aliquote de l'unité.

2° *Relation entre la valeur numérique et l'unité.* — Soit A une quantité concrète (longueur, superficie, volume ou poids), et soit a l'unité de mesure adoptée (mètre, are, litre ou gramme) : la valeur n de A sera, par définition, le quotient $\frac{A}{a}$. On a donc

$$n = \frac{A}{a}.$$

Il résulte de cette formule que la valeur d'une grandeur varie *en raison directe* de cette grandeur elle-même, et *en raison inverse* de l'unité de mesure. Ainsi la distance de Paris à Vierzon (sur la voie ferrée), mesurée en kilomètres, a pour valeur le nombre 200; la distance de Paris à Limoges, qui est exactement double de la précédente, a pour valeur le nombre 400. Et si l'on évaluait ces deux distances à l'aide de la lieue (unité itinéraire *quadruple* du kilomètre), leurs valeurs numériques seraient représentées par 50 et par 100, nombres *quatre fois plus petits*.

3° *Unités arbitraires.* — *Système de mesures rationnelles : unités fondamentales et unités dérivées.* — Dans le choix des unités de mesure, on peut ne tenir aucun compte des relations physiques qui existent, ou des relations mathématiques qu'on peut établir entre les diverses grandeurs à mesurer. On a alors un ensemble d'unités de mesure complètement indépendantes les unes des autres : ce sont des *unités arbitraires*. L'usage de pareilles unités a prévalu en France jusqu'en 1795, et il se perpétue de nos jours *dans la plupart des pays* étrangers.

On peut, au contraire, profiter de ces relations, naturelles ou géométriques, entre les grandeurs d'espèces différentes, pour exprimer toutes les unités de mesure en fonction d'un petit nombre d'entre elles, convenablement choisies. Celles-ci restent seules des unités arbitraires : on les appelle *unités fondamentales*; toutes les autres s'en déduisent au moyen de *relations* ou de *définitions* aussi simples que possible : on les appelle *unités dérivées*. Leur ensemble constitue un système qu'on peut appeler *système de mesures rationnelles*. Tel est le *système des poids et mesures métriques* ou *système métrique* établi en France par la Convention nationale en 1795[1]. Tel est aussi le *système des mesures absolues* ou *système des unités C. G. S.*, introduit dans les sciences physiques, en 1881, par le Congrès international des électriciens.

74. Avantages généraux d'un système de mesures rationnelles. — Il suffit de comparer les unités métriques aux anciennes unités françaises ou bien aux unités étrangères actuelles pour faire ressortir la supériorité des mesures rationnelles sur les mesures arbitraires. Dans le système métrique, qui ne comporte que les mesures d'étendue et de forces, il n'y a qu'une unité fondamentale, le *mètre*. Toutes les autres unités sont des *unités dérivées*. Leurs valeurs, et leurs noms même, se déduisent du mètre, soit par des définitions géométriques (mètre carré, mètre cube), soit par des définitions arbitraires, mais très simples (gramme). Le système métrique a donc remplacé par deux mots nouveaux, et quelques mots composés, la terminologie prolixe, confuse et incohérente des anciennes mesures françaises (toise, pied, perche, arpent, boisseau, setier, livre, grain, etc., etc.), ainsi que des mesures étrangères (pouce, yard, mille, acre, pinte, grain, livre, etc., etc.). C'est un perfectionnement comparable à ceux qui furent introduits dans l'arithmétique par la numération décimale, et dans la chimie moderne par la nomenclature de Lavoisier.

En outre, la réduction des unités de mesure en fractions d'unité et la réduction inverse, — qui sont des opérations assez compliquées lorsqu'il s'agit de mesures arbitraires, — deviennent des plus simples, au contraire, avec les unités métriques.

On peut enfin, par un choix convenable des *unités dérivées*, introduire dans les formules principales de la science les mêmes simplifications que dans les calculs.

1. Loi du 18 germinal an III.

75. Insuffisance du système métrique. Nécessité d'un système de mesures absolues : système de Gauss et système C. G. S. — Le système métrique ne comporte que des unités d'étendue et des unités de poids : il ne peut donc pas suffire à l'évaluation de toutes les grandeurs que l'on considère en mécanique et en physique. Il présente un inconvénient encore plus grave : c'est de n'avoir pas été universellement adopté par toutes les nations civilisées. Aussi les savants étrangers ont-ils employé dans leurs travaux des unités de mesure différentes des unités métriques et différentes entre elles.

Il est résulté de cette multiplicité de mesures que les mêmes formules ont été écrites, en divers pays, avec des coefficients différents, et que des résultats d'expériences identiques ont été exprimés par des nombres bien distincts. Pour n'en citer qu'un exemple, la même valeur de g qui est représentée en France par le nombre 9,80 (unités métriques) était représentée en Angleterre par le nombre 32,2 (pied anglais et seconde). Par suite, la lecture des mémoires scientifiques, rendue déjà si difficile par l'usage des langues étrangères, s'est déplorablement compliquée par l'emploi de ces unités différentes et par la nécessité de réduire tous les résultats numériques à une échelle commune.

Ce fut Gauss qui proposa le premier d'établir un système de mesures rationnelles, qui, à défaut de langue scientifique universelle, deviendrait un système de mesures universel et supprimerait tous les inconvénients des systèmes arbitraires ou nationaux.

L'*Association Britannique pour l'avancement des sciences* reprit l'idée de Gauss. Elle proposa, dès 1852, un *système d'unités absolues*, peu différent de celui de Gauss, qui fut adopté en 1865 par la Société royale de Londres. C'est le même système qui fut discuté et précisé en 1881 par le Congrès des Électriciens, et définitivement consacré sous le nom de *Système des unités absolues* ou *Système C. G. S.* Cette dernière appellation est une abréviation des mots *Centimètre-Gramme-Seconde*, noms des trois unités fondamentales adoptées dans ce système[1].

76. **Exposé du Système C. G. S.** — On appelle *système C. G. S.* l'ensemble des unités de mesure rationnelles, dites *unités absolues* ou *unités C. G. S.* On peut les subdiviser en trois catégories : les *unités fondamentales*, les *unités dérivées* et les *unités secondaires*.

1. Il convient d'adopter ce système de mesures, malgré les nombreuses imperfections de détail qu'il comporte. Nous indiquerons désormais les valeurs de toutes les constantes de la physique, d'abord en unités vulgaires du système métrique, et puis en unités absolues du Système C. G. S.

I. Unités fondamentales. — Ce sont les unités de mesure arbitraires et indépendantes d'où l'on peut dériver toutes les autres, et qui sont, par conséquent, comme les *fondements* du système tout entier. Trois unités suffisent pour exprimer toutes les autres. Ce sont :

Une longueur définie, le *centimètre*;
Une masse définie, la *masse du gramme*;
Un intervalle de temps défini, la *seconde*[1].

C'est avec les premières lettres C, G et S de ces trois unités qu'on a formé le symbole caractéristique de ce système.

1° *Unité de longueur C. G. S. : centimètre.* — Le centimètre se définit *théoriquement* : la centième partie du *mètre théorique*, c'est-à-dire de la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. Mais, comme il existe une petite différence entre le mètre théorique et la règle en platine déposée aux Archives sous le nom de *mètre-étalon*, c'est la *centième partie* de ce *mètre-étalon* qui a été prise pour unité de longueur dans le système C. G. S.

2° *Unité de masse C. G. S. : gramme-masse.* — Un *poids défini* ne pouvait servir d'unité fondamentale de force pour un système de mesures international, parce que, comme nous l'avons vu précédemment, le poids d'une masse déterminée est variable avec la latitude. Cet inconvénient, signalé par Gauss, le conduisit à prendre pour unité fondamentale une *masse définie*, qui est une grandeur *absolue*, c'est-à-dire invariable, indépendante de la latitude : il choisit la *masse du gramme*. C'est cette même unité qui a été adoptée dans le système C. G. S. Les Anglais l'appellent *gramme* tout court; mais en France nous sommes obligés de la nommer *masse du gramme* ou *gramme-masse*[2].

Le *gramme-masse* se définit théoriquement : la *millième partie* de la masse du *kilogramme théorique*, le kilogramme théorique étant lui-même le poids de 1 décimètre cube d'eau pure à 4°, pesé dans le vide, à Paris. Mais le lingot de platine qui a été fondu pour réaliser le kilogramme théorique (et qui est déposé aux Archives sous le nom de *kilogramme-étalon*), a une masse un peu inférieure à la masse théorique[3] : c'est donc *la millième partie de la masse du kilogramme-étalon* qui a été prise pour unité de masse C. G. S.

3° *Unité de temps C. G. S. : seconde.* — On a adopté l'unité de temps la plus généralement employée jusqu'alors, c'est-à-dire la *seconde* de temps moyen. On définit la *seconde* : la quatre-vingt-six-mille-quatre-centième partie ($\frac{1}{86400}$) du *jour solaire moyen*.

1. Ce choix particulier est une affaire de convenance plutôt que de nécessité : car trois unités indépendantes suffisent en théorie pour fonder tout le système. Par exemple on aurait pu prendre :

Une masse définie,
Une quantité d'énergie définie,
Une densité définie.

2. Cette obligation est une objection grave contre le choix du mot *gramme*. En effet, ce mot ayant déjà en France un sens précis et usuel, il est impossible de l'adopter tel quel. On est donc amené à employer le mot barbare de *gramme-masse*, en réservant le mot *gramme-poids*, qui est un pléonasme, pour désigner l'unité de poids du système métrique. Le même inconvénient ne s'est pas produit dans la langue anglaise, puisque le mot *gramme* y était complètement étranger.

3. D'après des recherches récentes, 1 centimètre *d'eau pure à 4°* a pour masse 1,0000013 (C. G. S.). *C'est à la température de 2°,85 ou à celle de 5°,15* que sa masse *devient égale à l'unité C. G. S.*

II. Unités dérivées. — Toutes les grandeurs mécaniques et physiques peuvent être mesurées à l'aide d'unités *dérivées* des précédentes.

1° *Unité de surface C. G. S. : centimètre carré.* — C'est le carré qui a pour côté l'unité de longueur C. G. S., c'est-à-dire *le carré de* 1 *centimètre de côté.*

2° *Unité de volume C. G. S. : centimètre cube.* — C'est *le cube ayant pour côté* 1 *centimètre*[1].

3° *Unité de vitesse C. G. S.* — C'est *la vitesse d'un mobile, animé d'un mouvement uniforme, qui parcourt* 1 *centimètre en* 1 *seconde* (c'est-à-dire l'unité de longueur dans l'unité de temps).

L'unité de vitesse n'a pas reçu de nom particulier : on l'appelle simplement *unité de vitesse C. G. S.*

4° *Unité d'accélération C. G. S.* — C'est *un accroissement de vitesse de* 1 *centimètre par seconde* (c'est-à-dire l'unité de vitesse C. G. S. par unité de temps C. G. S.), dans un mouvement uniformément accéléré.

Cette unité n'a pas reçu de nom particulier : on l'appelle simplement *unité d'accélération C. G. S.*

Ainsi l'accélération de la pesanteur à Paris, qui est représentée par le nombre 9,8096 en unités métriques, est égale à 980,96 en unités d'accélération C. G. S. Les formules qui donnent l'accélération et la longueur du pendule à secondes, à la latitude λ et à l'altitude z, ont été données précédemment, dans le système C. G. S.

5° *Unité de force C. G. S. : dyne.* — C'est *la force* (constante en grandeur et en direction) *qui, en agissant sur l'unité de masse C. G. S., lui imprime l'unité d'accélération C. G. S.* Cette unité de force C. G. S. a reçu le nom particulier de *dyne*[2].

A Paris le *gramme-poids* imprime à l'unité de masse C. G. S. (c'est-à-dire à sa propre masse) une accélération égale à 980,96; donc, en vertu du principe de la proportionnalité des forces aux accélérations, on a

$$\frac{1\ \text{(gramme-poids)}}{1\ \text{(dyne)}} = \frac{980{,}96}{1} = 980{,}96.$$

Le gramme-poids vaut donc 980,96 dynes.

Par suite, la dyne vaut, en unités métriques, $\frac{1}{980{,}96}$ de gramme-poids, c'est-à-dire environ 1 *milligramme-poids.*

La valeur du gramme-poids varie avec la latitude, tandis que la dyne a une valeur constante. Ainsi le gramme-poids vaut $980^d{,}61$ à la latitude de 45°, et $978^d{,}10$ sous l'équateur.

6° *Unité de travail C. G. S. : erg.* — C'est *le travail effectué par une dyne qui déplace son poids d'application de* 1 *centimètre dans sa propre direction.* On lui a donné le nom particulier de *erg*[3].

1. Grâce au choix du centimètre comme unité C. G. S., il se trouve que la *densité C. G. S.* de l'eau pure (c'est-à-dire la masse du centimètre cube) est égale à l'*unité*, tandis que, dans le système métrique, où l'unité de volume est le décimètre cube, cette densité est égale à 1 000 000. C'est pour cela qu'on a adopté le centimètre et le gramme, plutôt que le mètre et le gramme.

2. De δύναμις, puissance, force.

3. De ἔργον, travail. En introduisant ce mot dans la langue française, on aurait dû en modifier l'orthographe et la prononciation, qui sont antifrançaises. L'un des mots *ergie*, *ergone* ou *ergue* eût été préférable au point de vue de la correction et de l'euphonie. Une bonne raison aurait pu faire adopter ce dernier : *c'est qu'il existe déjà* dans la langue, puisque le mot français *exergue* vient *également de* ἐξ *et* ἔργον.

La force de 1 kilogramme-poids valant 1000 grammes-poids, c'est-à-dire 980 960 dynes, et 1 mètre valant 100 centimètres, le produit de ces deux nombres, qui représente de 1 kilogrammètre, est égal à $980\,960 \times 100$ ergs. Par conséquent, un *erg* vaut $\frac{1^{\text{kgm}}}{98\,096\,000}$, environ *un cent-millionième* de kilogrammètre.

Remarque. — L'unité de travail est en même temps *l'unité d'énergie*, soit que l'on considère l'énergie à l'état potentiel, soit qu'on la considère à l'état cinétique (principe de l'équivalence du travail et de l'énergie).

L'unité de puissance C. G. S. est *la puissance d'un moteur qui fournit un erg par seconde*. Cette unité n'a pas reçu de nom particulier : on l'appelle simplement *unité de puissance C. G. S.*

Cette unité est d'une petitesse extrême par rapport à l'unité métrique. En effet, 1 kilogrammètre vaut 98 096 000 ergs; par suite, 1 cheval-vapeur vaut $75 \times 98\,096\,000$ ergs, ce qui fait 7 357 200 000 ergs : par conséquent, un moteur qui fournit 75 kilogrammètres par seconde fournit 7 357 200 000 ergs par seconde; il a donc une puissance de 7 357 200 000 unités C. G. S. Inversement, l'unité de puissance C. G. S. est égale à

$$\frac{1 \text{ (cheval-vapeur)}}{7\,357\,200\,000},$$

environ *un sept-milliardième* de cheval-vapeur[1].

III. Inconvénient pratique des systèmes d'unités absolues : unités secondaires. — L'emploi de ces unités conduit souvent, dans la pratique, à des nombres extrêmement grands ou extrêmement petits, qui sont aussi incommodes à écrire qu'à énoncer.

Le système métrique n'était pas exempt de ce défaut. Le mètre, qui est d'un usage commode pour mesurer les longueurs usuelles, telles que la taille d'un homme, la largeur d'une place, la hauteur d'un édifice, ne convient plus ni pour les grandeurs astronomiques ni pour les grandeurs microscopiques. Aussi les fondateurs du système métrique avaient-ils donné le moyen de remédier à cet inconvénient par la création de multiples et sous-multiples de l'unité fondamentale et d'unités dérivées, le kilomètre et le myriamètre, l'hectogramme et le kilogramme, etc., qui sont des *unités secondaires*.

Les fondateurs du système C. G. S. ont emprunté au système métrique l'emploi des unités secondaires, ainsi que la règle de leur formation; ils ont seulement ajouté aux préfixes métriques deux préfixes nouveaux : *méga* (de μέγας, grand), qui veut dire un million, et *micro* (de μικρός, petit), un millionième. Ainsi un *mégerg* désigne une unité secondaire d'énergie valant un million d'ergs (environ un centième de kilogrammètre), et le *micromètre* ou *micron*, une unité secondaire valant *un millionième de mètre*[2].

Remarque. — *Notation du système C. G. S.* — La commission des unités C. G. S. a aussi prévu le cas où, malgré l'emploi d'unités secondaires, on serait conduit à des nombres trop grands ou trop petits et elle a indiqué un moyen simple et commode de les écrire. On met chaque nombre sous la forme d'un produit de deux facteurs, dont l'un est une puissance de 10 choisie de telle manière que

1. Évaluée avec cette unité, la puissance d'une *mouche* vaudrait *plusieurs unités*, celle d'un homme de peine en vaudrait *plus d'un milliard* et celle d'un cheval de trait près de *deux milliards et demi*.

2. A cause du sens spécial que le mot micromètre possédait antérieurement, les micrographes qui se *servent de cette unité secondaire* l'appellent ordinairement *mécron*.

l'autre facteur soit inférieur à 10. On aura en général $N = K.10^m$. On écrira, par exemple, que

1 kilogrammètre vaut $0^{mg},98096 \times 10^8$,
1 cheval-vapeur — $0,73572 \times 10^{10}$ *unités de puissance C. G. S*

Cette notation est avantageuse pour les calculs logarithmiques, car l'exposant de la puissance de 10 est précisément égal à la caractéristique, positive ou négative, du logarithme du nombre N.

77. **Conversion des mesures rationnelles en mesures absolues : dimensions et équations de dimensions.** — Étant donnée une grandeur exprimée en unités rationnelles quelconques, métriques ou étrangères, on peut avoir besoin de la convertir en unités C. G. S. Ce calcul se fera aisément si l'on connaît l'*équation des dimensions* des unités dérivées employées.

On est convenu de dire que toute unité dérivée *qui est du 2e degré* par rapport à l'unité fondamentale, c'est-à-dire *qui varie proportionnellement à la 2e puissance* de cette unité fondamentale, a *deux dimensions* (ou que *sa dimension est* 2) par rapport à l'unité fondamentale; et, en général, que toute unité dérivée qui est du degré *n* par rapport à l'unité fondamentale a *n dimensions* (ou que *sa dimension est* n) par rapport à l'unité fondamentale.

Par exemple, une vitesse *v* s'obtient, dans un mouvement uniforme, en divisant l'espace parcouru *l* par le temps θ employé à le parcourir, de sorte qu'on a $v = \frac{l}{\theta}$. C'est cette relation qui sert à définir l'unité de vitesse C. G. S. : on dit que l'unité de vitesse V est celle du mobile qui parcourt uniformément l'unité de longueur L dans l'unité de temps T. On a donc entre ces trois unités la relation $V = \frac{L}{T}$, qu'on peut écrire aussi, d'après une notation usitée en algèbre, $V = L.T^{-1}$. D'après cette équation, on dira que la vitesse est de la dimension 1 par rapport à l'unité de longueur et de la dimension (— 1) par rapport à l'unité de temps.

Formules de définition. — Équations des dimensions. — L'équation $v = \frac{l}{\theta}$, qui nous a servi à trouver les *dimensions* de l'unité de vitesse, est ce qu'on appelle la *formule de définition* de l'unité de vitesse. Chaque unité dérivée, dans un système d'unités absolues, se rattache aux unités fondamentales au moyen d'une relation analogue. Tantôt cette relation exprime analytiquement une définition, tantôt elle exprime quelque propriété géométrique ou mécanique, ou bien encore une loi physique.

L'équation $v = \frac{l}{\theta}$ convient à l'unité de vitesse comme à toute vitesse : nous en avons conclu que l'unité de vitesse varie proportionnellement à l'espace parcouru, c'est-à-dire à l'unité de longueur, et en raison inverse de l'unité de temps, c'est-à-dire de la seconde. On exprime habituellement ce rapport des unités par l'équation

$$\text{unité de vitesse} = \frac{\text{unité de longueur}}{\text{unité de temps}},$$

qu'on écrit encore, par abréviation,

$$\text{vitesse} = \frac{\text{longueur}}{\text{temps}}, \text{ ou encore}$$

$$V = \frac{L}{T} = LT^{-1},$$

Sous cette dernière forme, la formule de définition est appelée l'*équation des dimensions* de la vitesse.

Nous avons conclu de cette relation que l'unité de vitesse est de la dimension 1 par rapport à l'unité de longueur et de la dimension (—1) par rapport à l'unité de temps. Les dimensions de chaque unité dérivée sont déterminées au moyen d'une équation analogue, qu'on déduit, de la même manière, de sa formule définitive.

Exemple d'une conversion d'unités. — *Soit, par exemple, v' la vitesse d'un train de chemin de fer faisant 60 kilomètres à l'heure : on demande d'exprimer cette vitesse en unités C. G. S.*

Soit v la valeur numérique C. G. S. On a, d'après la définition de la valeur numérique (73, 2°),

$$\frac{v}{v'} = \frac{L' T^{-1}}{L\ T^{-1}} = \frac{L'}{L}\,\frac{T}{T'}.$$

Or

$$\frac{L'}{L} \quad \text{c'est} \quad \frac{60^{km}}{1^{cm}} = \frac{60\,000\,000^{cm}}{1^{cm}} = 60\,000\,000$$

et

$$\frac{T}{T'} \quad \text{c'est} \quad \frac{1^{s}}{1^{h}} = \frac{1^{s}}{3600^{s}} = \frac{1}{3600}.$$

En substituant ces valeurs numériques, il vient

$$v = 60 \times 60\,000\,000 \times \frac{1}{3600} = 100\,000.$$

Remarque. — Le problème réciproque se résoudrait de la même manière. On convertirait une valeur numérique, obtenue dans un certain système d'unités absolues, en la valeur numérique correspondante dans un autre système quelconque d'unités absolues (*en supposant que les deux systèmes ne diffèrent entre eux que par la grandeur des unités fondamentales*).

78. **Dimensions et équations des dimensions des principales unités mécaniques dérivées.** — On pourra résoudre tous les problèmes de ce genre, quelle que soit l'unité dérivée en jeu, pourvu qu'on en connaisse les dimensions. Voici donc les équations correspondantes à toutes les unités mécaniques ci-dessus définies.

1° Unité de vitesse C. G. S.

Formule de définition : $v = \frac{e}{\theta}$.

Équation des dimensions : $V = \frac{L}{T} = LT^{-1}$.

Dimensions : 1 par rapport à la longueur, — 1 par rapport au temps, — 0 par rapport à la masse.

2° Unité d'accélération C. G. S.

Formule de définition : $v - v_0 = \gamma\theta$, d'où $\gamma = \frac{v - v_0}{\theta}$.

Équation des dimensions. — On voit, d'après la *formule*, que l'accélération est proportionnelle à une *différence de vitesse, c'est-à-dire* à une vitesse ou à

$\frac{L}{T}$, et inversement proportionnelle à un temps, c'est-à-dire à T. On a donc

$$G = \frac{\frac{L}{T}}{T} = \frac{L}{T^2} = LT^{-2}.$$

Dimensions : 1 (longueur), — 2 (temps), — 0 (masse).

3° Dyne.

Formule de définition : $f = m\gamma$.

Équation des dimensions. — La force est proportionnelle à une masse et à une accélération. On a donc

$$F = MG = \frac{ML}{T^2} = MLT^{-2}.$$

Dimensions : 1 (longueur), — 2 (temps), — 1 (masse).

4° Erg.

Formule de définition : $w = fe$.

Équation des dimensions. — Le travail est proportionnel à une force et à un chemin parcouru. On a donc

$$W = FL = \frac{ML}{T^2} \cdot L = \frac{ML^2}{T^2} = ML^2T^{-2}.$$

Dimensions : 2 (longueur), — 2 (temps), — 1 (masse).

5° Unité de puissance C. G. S.

Formule de définition : $p = \frac{w}{\theta}$.

Équation des dimensions. — On voit que la puissance varie en raison directe du travail et en raison inverse du temps. On a donc

$$P = \frac{W}{T} = \frac{ML^2}{T^3} = ML^2T^{-3}.$$

Dimensions : 2 (longueur), — 3 (temps), — 1 (masse)[1].

MESURE DES GRANDEURS FONDAMENTALES.

79. **Généralités sur les mesures et les instruments de précision.** — Presque toutes les mesures qu'on a à effectuer en physique peuvent se ramener à des mesures de longueur, de masse et de temps, grandeurs fondamentales du système C. G. S. Ainsi les mesures d'étendue se réduisent à des mesures de lignes. De même les mesures de forces se réduisent à des mesures de masses, puisque les forces se comparent aux poids et que ceux-ci s'expriment en fonction des masses et de l'accélération de la pesanteur ($P = Mg$). Comme les mesures scien-

1. Nous n'avons défini ici que les unités relatives aux grandeurs étudiées précédemment. Nous définirons les autres unités au fur et à mesure qu'elles se *présenteront* dans le cours de cet ouvrage.

tifiques exigent une grande exactitude, on a dû construire des instruments spéciaux pour les effectuer : c'est ce qu'on appelle les *instruments de précision*. Ces instruments se rapportent donc à trois types principaux.

I. *Instruments de mesure* pour les *dimensions linéaires* (longueurs, largeurs, épaisseurs, hauteurs). Ce sont :

1° La *règle divisée*, vulgairement appelée *mètre* ;
2° Le *vernier* rectiligne et le *vernier* circulaire ;
3° Le *sphéromètre* ;
4° Le *cathétomètre* ;
5° Le *micromètre oculaire* ;
6° Le *comparateur* ;
7° La *machine à diviser*.

II. *Instruments de mesure* pour les *masses*, les *poids* et les *forces*.

Les masses se mesurent à l'aide de la *balance*, qui est l'instrument de précision par excellence. Elle peut servir indirectement à la mesure des poids et des forces, puisqu'on peut déduire ces grandeurs de la mesure des masses. Mais nous avons vu (23) qu'on peut mesurer directement les forces avec des instruments spéciaux, appelés *dynamomètres*, qui ne sont pas des instruments de précision.

III. *Instruments de mesure* pour le *temps*.

Le temps est une grandeur qu'on peut aussi mesurer directement avec une grande précision. Les instruments de mesure sont les *horloges* et les *chronomètres*. La marche des horloges est rendue régulière au moyen des oscillations isochrones d'un pendule (72), et celle des chronomètres à l'aide d'un ressort métallique : les uns et les autres sont réglés, d'après des observations astronomiques et spécialement sur les passages des étoiles, de manière à donner une subdivision du temps exactement égale à la *seconde de temps moyen*, unité de temps C. G. S.

80. **Règles divisées. — Mètre-étalon.** — Les *règles divisées*, qui servent dans les mesures ordinaires, sont généralement des lames plates en laiton, graduées en millimètres. La distance des deux traits extrêmes est exactement de 1 mètre, à la température 0° : on la vérifie par comparaison avec un *mètre-étalon*, à l'aide de l'instrument de précision appelé *comparateur*. Les traits intermédiaires sont distants deux à deux de 1 millimètre ; on les trace à l'aide de l'instrument de précision appelé *machine à diviser*.

Lorsqu'on mesure une longueur à l'aide d'une règle divisée, on trouve en général un certain nombre de divisions, c'est-à-dire de millimètres, *plus* un reste. On ne peut songer à évaluer ce reste au moyen d'une nouvelle subdivision de la règle, car le 1/2 millimètre se lit déjà péniblement ; il faut savoir évaluer cette fraction à l'œil, *par estime*[1], ou bien recourir à un instrument de précision.

Les mètres-étalons qui servent à la vérification des règles divisées sont des copies exactes de l'*étalon international*, construit récemment par la Commission internationale du mètre. Cet étalon international est lui-même une copie exacte du *mètre normal* déposé aux Archives. Mais, tandis que ce dernier est un *mètre à bouts*, c'est-à-dire une barre qui a 1 mètre de longueur d'une extrémité à l'autre, l'étalon international est un *mètre à traits*, qui représente le mètre par la distance de deux traits, placés à 1 centimètre environ de ses extrémités. Ce dispositif permet plus facilement que l'autre de prendre des copies rigoureusement exactes. Le mètre international n'a pas été fondu en platine, mais en

1. Après un long exercice, le physicien parvient à *évaluer à l'œil* le dixième de millimètre, comme l'astronome *apprécie à l'oreille le dixième* de seconde.

un alliage de platine et d'iridium (platine iridié), qui est plus résistant et plus inaltérable encore que le platine pur. Enfin on lui a donné la forme d'un solide symétrique à quatre rainures (fig. 59), qui paraît, d'après les travaux de Tresca, présenter le maximum de résistance à la flexion. Les deux traits qui

Fig. 59.

définissent la longueur du mètre sont tracés sur le plan qui contient le centre de gravité du solide.

Les copies du mètre international sont en tout semblables à l'étalon et fondues également en platine iridié.

81. **Vernier.** — 1° *Définition.* — Le vernier est un instrument de précision qui permet d'évaluer des longueurs plus petites que les dernières divisions d'une règle divisée ou d'un cercle divisé, tout en n'offrant lui-même que des divisions à peu près égales à celles-ci et aussi faciles à lire. Suivant que le vernier est adapté à une règle droite ou à un limbe circulaire, on l'appelle *vernier rectiligne* ou *vernier circulaire*[1].

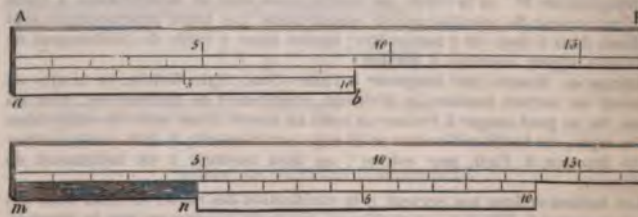


Fig. 60 et 61.

2° *Description du vernier rectiligne.* — Cet instrument n'est jamais seul ; il est toujours adapté à une règle divisée, tantôt indépendante, tantôt fixée elle-même à un autre instrument.

Il se compose, dans tous les cas, d'une réglette divisée *ab* qui peut glisser le

1. L'invention du vernier rectiligne est due au géomètre français Pierre Vernier, qui a donné son nom à l'instrument. Le vernier circulaire paraît avoir été inventé antérieurement, par le géomètre portugais Nuñez ou Nonius (1542).

de règle AB, de manière que les deux graduations se touchent
i donne, le plus souvent, une longueur égale à 9 divisions de
, soit 9 millimètres, puis on la divise en 10 parties égales. Il en
aque division du vernier *ab* est d'un dixième de millimètre
celles de la règle AB. On a alors un *vernier au dixième* : c'est
us employé; il peut servir à évaluer des longueurs à moins d'un
imètre.

ernier rectiligne. — Soit à mesurer la longueur d'un objet *mn*
ce celui-ci le long de la grande règle, et l'on trouve ainsi qu'il
une longueur de 4 divisions *plus* une fraction. C'est cette frac-
esurer avec le vernier. Pour cela, on le fait glisser sur la règle
qu'il vienne se placer à l'extrémité de l'objet *mn*, puis on
it sensiblement la coïncidence entre les traits des deux échelles.
ig. 61) qu'elle a lieu à la huitième division du vernier, à partir
indique que la fraction à mesurer est égale à 8 dixièmes d'une
ande règle, soit 8 dixièmes de millimètre.

livisions du vernier étant plus petites d'un dixième que celles
oit qu'à partir du point de coïncidence, en allant de droite à
ut successivement en retard sur celles de la règle de 1, de 2, de
'extrémité *n* du vernier à la 4e division de la règle, il y a donc
ie *mn* égale 4mm,8.

ectilignes au vingtième, au cinquantième, etc. — Pour obtenir
à un vingtième ou à un trentième de millimètre, il suffirait de
ier une longueur de 19 ou 49 millimètres, puis de diviser celui-ci
ties égales : on aurait
r au vingtième ou *au*
Par exemple, le ca-
muni d'un vernier *au*

rculaire. — Le vernier
si à la mesure des arcs
fut même là son pre-
se compose alors d'un
ercle divisé, porté à
ne alidade (fig. 62). Il
le sur le grand cercle

Fig. 62.

la réglette sur la grande règle de l'instrument précédent. La
age du vernier circulaire sont les mêmes que pour le vernier

ulier dans l'usage des verniers. — Il peut arriver que pas un
r ne soit en coïncidence avec l'un des traits de la règle.

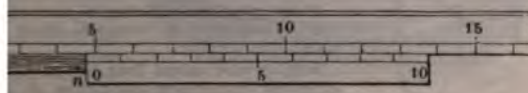


Fig. 63.

on trouve *nécessairement* deux traits consécutifs du vernier
ment compris entre deux traits consécutifs de la règle. Suppo-
que ce soient les traits 7 et 8. La distance de chacun de ces traits
de la règle est une longueur $< \frac{1}{10}$ de millimètre, puisque la
deux distances est *précisément égale à* $\frac{1}{10}$ *de millimètre*. S.

donc on fait la mesure comme si l'un ou l'autre coïncidait, on commettra une erreur moindre que $\frac{1}{10}$ de millimètre. En admettant la coïncidence du trait inférieur 7, on réduit la longueur à mesurer, et l'erreur est commise par défaut; en prenant le trait 8, l'erreur est par excès. On aura donc dans ce cas

$$mn = 4^{mm},7 \text{ à } \frac{1}{10} \text{ de millimètre près, par excès,}$$

ou bien

$$mn = 4^{mm},8 \text{ à } \frac{1}{10} \text{ de millimètre près, par défaut.}$$

On voit même que si l'on peut distinguer, soit à l'œil nu, soit à la loupe, celui des deux intervalles qui est le plus petit, en choisissant le trait correspondant à celui-ci, on commettra une erreur moindre que $\frac{1}{20}$ de millimètre (par excès ou par défaut).

Reste à démontrer qu'il y a toujours une division du vernier entièrement comprise entre deux traits consécutifs de la règle. En effet, la fraction de mn, qui dépasse le trait 4 de la règle, est égale à $\frac{n^{mm}}{10} + \varepsilon$, n étant un nombre entier au plus égal à 9 et ε une fraction $< \frac{1}{10}$. La distance du trait 0 du vernier au trait précédent de la règle est précisément à $\left(\frac{n}{10} + \varepsilon\right)^{mm}$; la distance du trait précédent de la règle sera donc $\left(\frac{n-1}{10} + \varepsilon\right)$, et ainsi de suite. En continuant ainsi, on trouvera de 0 à 10 un trait du vernier dont la distance au trait précédent de la grande règle ne sera plus que ε; par suite, en allant toujours vers la droite, on trouvera d'abord un trait du vernier à la distance $\frac{1}{10}$ de millimètre, puis un trait de la règle à la distance $\left(\frac{9}{10} + \varepsilon'\right)$, ε' étant $< \frac{1}{10}$; ce dernier et le précédent trait de la règle comprennent donc entre eux toute une division du vernier.

82. Vis micrométrique. — 1° *Définition.* — On nomme *vis micrométrique* toute vis qui peut servir à produire des déplacements très lents et très réguliers. La *vis micrométrique* n'est pas, à proprement parler, un instrument de précision, mais elle sert d'organe essentiel à plusieurs instruments de précision.

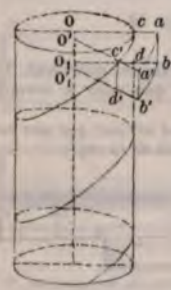


Fig. 64.

2° *Génération et propriétés de la vis.* — Soit une hélice à spires nombreuses et serrées, tracée sur un long cylindre directeur (fig. 64). Imaginons qu'un petit rectangle *abcd* se meuve à la surface du cylindre, en étant assujetti aux conditions géométriques suivantes :

1° Son plan est constamment normal au cylindre.

2° Le sommet c du rectangle décrit l'hélice directrice.

Dans ce mouvement tous les points du rectangle décrivent évidemment des hélices de même pas que l'hélice directrice. Le lieu de toutes ces hélices est un volume de forme hélicoïdale, qu'on appelle *filet* de la vis, et la *vis* elle-même est constituée par l'ensemble du filet et du cylindre directeur. On appelle *pas* de la vis le pas de l'une quelconque des hélices décrites par les divers points du rectangle générateur.

Le plan normal à la surface cylindrique, qui contient le rectangle générateur, est ce qu'on appelle un *plan de profil* ou simplement un *profil*.

De la figure du profil dépend la forme du filet. Dans le cas de la figure, la vis est *à filet rectangulaire*.

Mais, dans la plupart des vis des instruments de précision, le filet est *triangulaire*; il est engendré par un *profil* qui est un triangle à peu près isocèle, dont la base est précisément égale au pas de l'hélice : il en résulte que la surface du cylindre directeur est complètement couverte par le filet (fig. 115).

3° *Construction de la vis.* — On réalise pratiquement la vis en taillant le filet sur un cylindre de métal, bronze, fer ou acier. A chaque vis est joint un *écrou*, sans lequel elle ne peut fonctionner. L'écrou est une pièce métallique qui présente en creux le relief du filet. Lorsqu'on engage la vis dans l'écrou, si celui-ci est fixe, en imprimant un mouvement de rotation à l'extrémité antérieure de la vis, appelée *tête de vis*, la vis avance dans son écrou parallèlement à l'axe du cylindre directeur : c'est celui-ci qui se déplace quand on fait tourner la tête de vis; ce mouvement est parallèle à l'axe du cylindre, mais en sens inverse de la rotation. La loi de ce déplacement, dans l'un et l'autre cas, est une conséquence de la propriété fondamentale de l'hélice : *Si l'on suppose que l'écrou soit mobile, l'un quelconque de ces points s'avance sur la vis en décrivant l'une des hélices qui constituent le filet. Le déplacement longitudinal de ce point, et par suite de l'écrou tout entier est proportionnel à l'angle de rotation de la tête de vis.*

La *vis micrométrique* est une vis travaillée avec beaucoup de soin et dont le pas est très petit, égal à un demi-millimètre ou à 1 millimètre au plus, et très régulier. On la taille sur le contour d'un cylindre bien homogène de bronze ou d'acier fondu, au moyen de procédés mécaniques fort perfectionnés.

85. Sphéromètre. — 1° *Définition.* — Le sphéromètre[1] est un instrument de précision qui peut servir aux usages suivants :

Mesure des faibles épaisseurs.

Vérification de la courbure des surfaces sphériques et mesure de leur rayon.

C'est de ce dernier usage que lui vient son nom.

2° *Description.* — L'instrument se compose essentiellement d'une vis micrométrique mobile dans un écrou fixe (fig. 65). L'écrou est fixé verticalement au centre d'un trépied, qui repose, par trois pointes fines en acier trempé, sur un plan de verre soigneusement doucí à l'émeri. Les extrémités des pointes forment les sommets d'un triangle équilatéral, et la verticale du centre de ce triangle coïncide avec l'axe de l'écrou et celui de la vis. Celle-ci a un pas très régulier, égal à $\frac{1}{2}$ millimètre. Elle se termine inférieurement par une pointe mousse, et supérieurement par une tête en forme de bouton fileté, par où l'on peut la manœuvrer aisément. En tournant dans le sens convenable, on peut amener la pointe de la

Fig. 65.

1. De σφαῖρα, sphère, et μέτρον, *mesure*.

vis dans le plan du support; en tournant en sens contraire, on relève la vis.

Ces déplacements verticaux sont toujours proportionnels aux angles de rotation. On les mesure avec facilité et précision au moyen du dispositif suivant : Sur l'une des branches du trépied est fixée verticalement une règle métallique, dont le bord mince est divisé en demi-millimètres. D'autre part, un disque mince, dont le limbe porte 500 divisions, est fixé horizontalement par son centre au-dessus de la tête de vis : il est entraîné avec elle dans son mouvement de rotation, et toutes ses divisions défilent successivement devant le bord de la règle fixe, lequel sert d'index.

Lorsqu'une seule division du limbe a passé devant l'index, la vis s'est déplacée de $\frac{1}{500}$ de la hauteur de son pas, c'est-à-dire de $\frac{1}{1000}$ de millimètre; lorsque le disque a fait un tour complet, la vis s'est déplacée de la hauteur du pas, c'est-à-dire de $\frac{1}{2}$ millimètre, et alors le disque ne se trouve plus en face de la même division de la règle, mais en face de la division suivante.

3° *Usages. — Mesure d'une épaisseur.* — Soit à mesurer, par exemple, l'épaisseur d'une glace à faces parallèles. On amène la pointe de la vis dans le plan du plateau de verre, et l'on note la division du limbe et la division du couteau, qui sont en face l'une de l'autre; soit n_0 la première et h_0 la deuxième.

On soulève ensuite la vis d'une hauteur suffisante pour intercaler la glace entre le plan et la pointe, puis on abaisse celle-ci jusqu'à la faire coïncider exactement avec la face supérieure de la glace; soient n_1 et h_1 les deux divisions en regard, dans la deuxième position.

L'épaisseur de la glace est évidemment mesurée par la course verticale de la pointe; or celle-ci est égale à un nombre de demi-millimètres marqué par les divisions du couteau, *plus* une fraction du pas marquée par les divisions du disque. On aura donc, en appelant e l'épaisseur,

$$e = \left(\frac{h_1 - h_0}{2} + \frac{n_1 - n_0}{1000}\right)^{mm}.$$

Mesure d'un rayon de courbure. — Soit à vérifier la sphéricité d'une surface convexe, par exemple d'un verre de lunette, et à en mesurer le rayon de courbure.

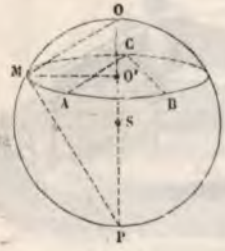


Fig. 66.

Fig. 67.

On place les trois pointes A, B, C de l'instrument sur la surface, et l'on amène la pointe centrale O en coïncidence (fig. 66). Les quatre points O, A, B, C déterminent une surface sphérique. En déplaçant l'instrument sur le verre, si celui-ci est sphérique, la coïncidence ne cessera pas. Elle cessera au contraire si la surface n'a pas un même rayon de courbure en tous ses points.

Supposons qu'elle soit parfaitement sphérique et cherchons à en mesurer le *rayon R. Dans l'une quelconque* des positions de l'instrument, le plan des trois

pointes inférieures coupe la sphère suivant un petit cercle, AMBC. Ce cercle est précisément égal au cercle circonscrit au triangle équilatéral qui a ces trois pointes pour sommets. Il suffira de construire le triangle ABC, dont on connaît les trois côtés, puis le cercle circonscrit, pour en avoir le rayon r (fig. 67).

On mesure ensuite la distance $OO' = e$ de la pointe mousse au centre du cercle. Pour cela, il suffit de replacer l'instrument tel quel sur son plan de verre, de noter les deux divisions h, n en regard, puis d'amener la pointe de la vis dans le plan du support, et de noter les nouvelles divisions n_0, h_0 en regard. On a alors, d'après la formule ci-dessus,

$$e = \left(\frac{h_1 - h_0}{2} + \frac{n_1 - n_0}{1000}\right)^{mm}.$$

Connaissant r et e, on obtient R par la formule connue $2R = e + \frac{r^2}{e}$.

Remarques. — 1° Le même procédé s'appliquerait au cas d'une surface sphérique concave.

2° Si l'on voulait mesurer l'épaisseur d'un corps filiforme, tel qu'un cheveu, ne pouvant être mis directement sous la vis, on n'aurait qu'à le placer entre le support et une lame à faces parallèles d'épaisseur connue e. On mesurerait l'épaisseur totale e' du système par le procédé ci-dessus indiqué, et l'on aurait

$$x = e' - e.$$

Fig. 68.

81. Application de la vis micrométrique : appareil de Borda. — L'appareil qu'avait imaginé Borda pour mesurer avec précision la longueur de son pendule était analogue à un sphéromètre.

1° *Description.* — Il se compose d'une vis micrométrique V mobile dans un écrou fixe E (fig. 68), qui est solidement attaché, à l'aide d'un trépied à vis (v, v, v), sur un support horizontal HH. La vis porte à son extrémité un petit plan d'acier mn bien perpendiculaire à l'axe du cylindre, et un peu plus bas un cercle divisé CC, dont le limbe se déplace en tournant devant un couteau divisé. La règle horizontale LL, qui est placée derrière le pendule B, servait à mesurer les amplitudes des oscillations.

2° *Opération.* — Il s'agissait de déterminer a, c'est-à-dire la distance de l'axe de suspension au centre de la sphère B. On disposait l'appareil sous cette sphère, et, en tournant la vis, on soulevait lentement le plan mn, jusqu'à ce qu'il vînt toucher la sphère en son point le plus bas. Le contact était *obtenu au moment* où l'on voyait disparaître la flamme d'*une bougie qu'on avait préalablement* disposée

derrière le pendule, à une certaine distance. On s'assurait que le contact n'était pas dépassé, en faisant alors osciller le pendule : on ne devait entendre qu'un léger frôlement contre le plan.

Cela fait, on enlevait le pendule et on lui substituait une règle divisée, munie d'un couteau de suspension à sa partie supérieure, et d'une languette mobile faisant vernier à sa partie inférieure. On avait plus qu'à amener la pointe de la languette au contact du plan *mn*, et à lire directement la distance du plan à l'axe de suspension : c'est la longueur que nous avons appelée précédemment λ (108) : on avait $\lambda = a + r$.

Pour mesurer r, on posait la boule du pendule sur le plan *mn*, et l'on manœuvrait la vis jusqu'à ce que la languette-vernier vînt toucher la sphère et, cette fois-ci, en son point le plus haut. La distance λ', qu'on lisait alors sur la règle, était égale à $a - r$. En prenant la demi-somme des deux lectures $\frac{\lambda + \lambda'}{2}$, on avait a; en prenant la demi-différence $\frac{\lambda - \lambda'}{2}$, on avait r.

85. **Machine à diviser.** — 1° *Définition.* — C'est un instrument de précision qui peut servir aux usages suivants :

Diviser une longueur donnée en un nombre déterminé de parties égales.
Tracer des divisions d'une longueur déterminée.
Mesurer exactement une longueur.

2° *Description.* — La machine à diviser se compose essentiellement d'une vis micrométrique fixe V qui mène un écrou mobile. Le cylindre de la vis est saisi vers ses deux extrémités entre deux colliers (fig. 69), dans lesquels il peut

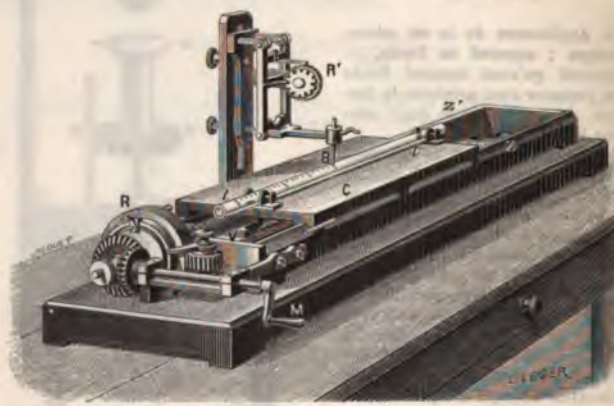


Fig. 69.

tourner sur place à frottement doux. On effectue la rotation à l'aide d'une manivelle M, qui est reliée à la tête de vis; on apprécie les angles de rotation à l'aide d'un disque à limbe divisé R, fixé par son centre près de la tête de la vis, comme celui du sphéromètre, et tournant avec elle devant un index fixe. *L'écrou embrasse la vis* et ne peut tourner avec elle. Il est forcé d'avancer *ou de reculer, suivant le* sens de la rotation. Comme le pas est de 1 millimètre et

que le cercle est divisé en 100 parties, on déplace l'écrou de $\frac{1}{100}$ de millimètre par division. A l'écrou est fixé un chariot d'acier C qui se meut avec lui en glissant sur le cadre z z'. On voit en B le burin, c'est-à-dire l'outil à pointe d'acier ou de diamant, qui sert à tracer des divisions sur les métaux ou sur le verre : l'appareil impose des longueurs spéciales aux divisions de 5 en 5 et de 10 en 10.

Un mécanisme, dont le dispositif varie avec les constructeurs, permet, par la combinaison d'une roue à rochet faisant corps avec la vis et d'un double système de butoirs et d'arrêts, de tourner aisément la manivelle d'un angle quelconque, variable à volonté, mais identique à lui-même, pendant toute une expérience.

2° *Usages. — Soit à tracer n divisions égales sur un tube de verre.*

On dispose le tube *tt* parallèlement à la vis V. Dans une opération préliminaire, on compte les nombres de tours et de centièmes de tour nécessaires pour faire marcher la pointe du burin entre les points extrêmes : soient $p + \frac{q}{100}$ ces nombres. Il est évident que pour avoir n divisions égales il faudra buriner un trait chaque fois qu'on aura fait $\frac{1}{n}\left(p + \frac{q}{100}\right)$ tours à partir du point O.

Remarque. — L'opération préliminaire ci-dessus montre comment on se sert de la machine pour mesurer avec précision une longueur quelconque K. On a en millimètres

$$K = p + \frac{q}{100}.$$

Soit à tracer des divisions de longueur déterminée.

On fixe la longueur à diviser, tube de verre ou règle métallique, comme précédemment. Soit l la longueur en millimètres du degré de l'échelle qu'on veut tracer. Le nombre de tours et de centièmes de tour correspondant à cette longueur est donné par l'équation précédente

$$p + \frac{q}{100} = l.$$

Il suffira donc d'arrêter le chariot et de buriner une division chaque fois qu'on aura avancé de $\left(p + \frac{q}{100}\right)$ tours de la vis.

86. **Cathétomètre.** — 1° *Définition.* — C'est un instrument de précision qui *sert à mesurer la distance verticale de deux points donnés*, par exemple la différence de niveau de deux colonnes liquides[1].

2° *Principe.* — L'instrument consiste essentiellement (fig. 70) en une tige verticale divisée (fig. 73), le long de laquelle peut glisser une lunette horizontale avec laquelle on vise successivement les deux points : leur distance verticale est donnée par la course de la lunette sur son support.

3° *Description.* — Une colonne d'acier de 1m.20 de hauteur, montée sur un trépied à vis calantes, porte le *corps* du cathétomètre. On nomme ainsi un tube creux de laiton PQ, qui s'engage comme un manchon sur la colonne d'acier, et tourne librement autour d'elle. Le tube PQ est en effet surmonté d'un chapeau de cuivre z (fig. 71) dont la tête est traversée par une vis d'acier x. La pointe de celle-ci porte sur l'extrémité axiale de la colonne, de manière que,

1. C'est de *cet usage que lui vient son nom* (de κάθετος, ligne verticale, et μέτρον, mesure).

lorsqu'on tourne la vis, on soulève tout le tube PQ, qui se trouve ainsi suspendu sur pivot; il est guidé à sa partie inférieure par un collier qui embrasse un tourillon conique réservé à la base de la colonne.

Le long du tube PQ glissent deux chariots AB et CD, reliés entre eux par une vis de rappel *t*, qui est micrométrique (fig. 72). Le premier porte une lunette

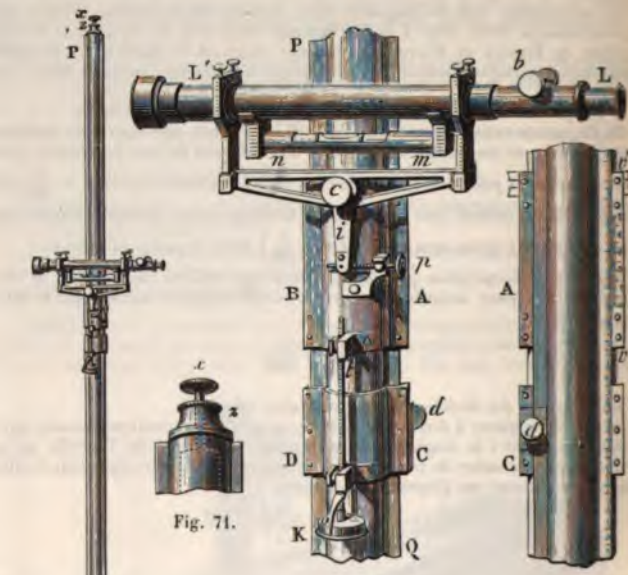


Fig. 71. Fig. 72. Fig. 73.

Fig. 70.

LL' et un niveau à bulle d'air *mn*, montés sur une fourchette mobile autour d'un axe *c* fixé sur le corps du cathétomètre. A la fourchette est fixé un levier *i*, qu'on incline plus ou moins à l'aide d'une vis de rappel *p*, pour obtenir l'horizontalité du niveau et de la lunette.

Le bouton K, qui fait marcher la vis *t*, porte sur sa circonférence une division en 100 parties; un repère *o*, fixé à la pièce DC, permet d'évaluer avec précision les angles de rotation. Le pas de la vis *t* étant de $\frac{1}{2}$ millimètre, il s'ensuit que, lorsqu'on tourne le bouton K de 1 division, le chariot AB et la lunette se déplacent de $\frac{1}{100}$ de millimètre. Enfin, sur toute la longueur du tube PQ est une échelle en millimètres, représentée sur la droite de la figure 73; un vernier *vv'*, lié au chariot A, glisse le long de l'échelle.

4° *Opération.* — Pour déterminer la position d'un point, on abaisse ou l'on *ve les deux chariots* et avec eux la lunette, jusqu'à ce que celle-ci soit à la *ur du point à observer*; puis, fixant le chariot DC au moyen d'une vis de

pression d, on tourne lentement le bouton K en visant le point en question à l'aide de la lunette. On arrête le mouvement au moment précis où l'image du point vient coïncider avec le point de croisement des fils du réticule. On connaît alors une horizontale sur laquelle se trouve le point visé : cette ligne est l'*axe optique* de la lunette. Pour en avoir exactement la hauteur au-dessus du *zéro* de l'échelle, on n'a qu'à lire l'indication du vernier sur celle-ci. On opère de la même manière pour déterminer la hauteur du second point donné. La différence entre les deux nombres obtenus est égale à la distance verticale des deux points.

5° *Réglage.* — Les indications du cathétomètre ne sont exactes que si l'instrument est bien réglé. Le réglage consiste dans la réalisation des conditions suivantes :

I. *L'axe optique de la lunette doit être parallèle à la ligne des repères du niveau.*

II. *L'axe optique de la lunette doit être perpendiculaire à l'axe de rotation.*

III. *L'axe de rotation de l'instrument doit être vertical.*

Remarque. — Le réglage du cathétomètre est une opération fort délicate, dont le développement nécessite la connaissance de la théorie du niveau et de celle des lunettes, et l'emploi de termes nouveaux, tels que axe optique, réticule, ligne des repères, etc., qui n'ont pas encore été définis. Nous exposerons plus loin ce réglage parmi les applications des lunettes.

87. **Micromètre oculaire.** — On appelle ainsi un microscope muni d'un oculaire micrométrique, qui sert à la *mesure d'une petite longueur* (fig. 76).

Pour mesurer la longueur comprise entre deux traits parallèles voisins t, t', on dispose, au-dessus des traits et en face d'eux, un microscope M de façon que les images T, T' des traits t, t', fournies par l'objectif O, se forment dans le plan du réticule R (fig. 75).

L'oculaire de Ramsden O', qui sert à l'observation, permet, de plus, d'aper-

Fig. 74.

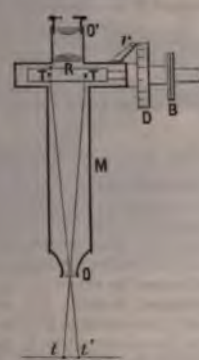


Fig. 75.

cevoir l'image P (fig. 74) d'une sorte de peigne placé très près du plan du réticule.

Le réticule est porté par l'intermédiaire d'un cadre qui reçoit d'une vis micrométrique un mouvement de translation. Cette vis est mise en mouvement au moyen du bouton B ; un tambour divisé D solidaire de B permet d'évaluer, grâce au repère r, les fractions de tour de la vis. Un tour complet de la vis déplace le réticule d'une longueur égale à *la distance de deux* dents consécutives du peigne.

On obtiendra donc la longueur tt' en évaluant le nombre de tours qui fait passer le réticule f de T à T'.

Soit n ce nombre, généralement fractionnaire, et N le nombre de tours qui

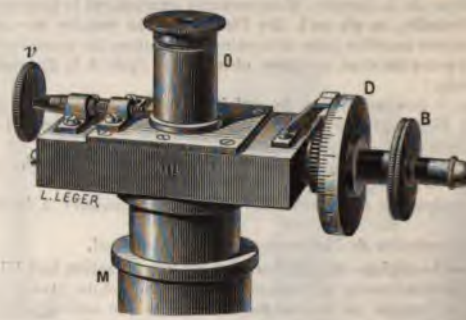


Fig. 76.

correspond à la mesure préalable d'une longueur connue l placée en tt'. On aura pour mesure L de la longueur cherchée

$$L = n \cdot \frac{l}{N}.$$

Un ressort appuie la vis contre son écrou de manière à supprimer tout *temps perdu*.

La valeur $\frac{l}{N}$ se nomme la *tare du micromètre*.

88. **Comparateur.** — On obtient un comparateur en disposant deux microscopes, semblables à celui qui vient d'être décrit, de manière que leurs axes soient parallèles (fig. 77).

Les axes des deux microscopes sont distants de la longueur dont on veut apprécier les petites variations au moyen des *micromètres oculaires*.

Ayant amené les réticules aux extrémités de la longueur à évaluer (hauteur barométrique, distance des arêtes des deux couteaux d'un pendule réversible, etc.), on substitue à celle-ci une règle divisée avec soin et on déplace les réticules des micromètres de manière à les amener en coïncidence avec l'image des divisions les plus voisines, intérieures ou extérieures à la longueur relevée. Dans le premier cas, aux divisions n_1, n_2 ainsi visées il faudra ajouter les déplacements v_1 et v_2 du micromètre de sorte que

$$x = (n_2 - n_1) + v_1 + v'_1.$$

Dans le second cas,

$$x = (n'_2 - n'_1) - (v'_2 + v'_2).$$

On connaît le nombre de tours qui correspond au déplacement $v_1 + v'_1$ égal à une division de la règle, d'où l'on déduit la tare du microscope M_1 ; on obtient de *la même manière*, au moyen du déplacement $v_2 + v'_2$, la tare de M_2.

Dans le comparateur employé au *Bureau international* des poids et mesures,

à Sèvres (fig. 77), les deux microscopes M, M' sont fixés à des piliers en maçonnerie P, P' par l'intermédiaire de fortes équerres.

Les règles à comparer sont placées dans deux auges parallèles A, A' à double enveloppe portées par un chariot mobile sur un solide bâti en fonte *rx*. Ce bâti a pour assise une épaisse couche de béton aggloméré.

Les bancs des auges intérieures qui supportent les règles sont munis à leurs extrémités de diverses vis de réglage permettant de mettre au point les traits terminaux des règles.

On conçoit sans peine la manœuvre. Un mètre étalon est dans l'une des auges,

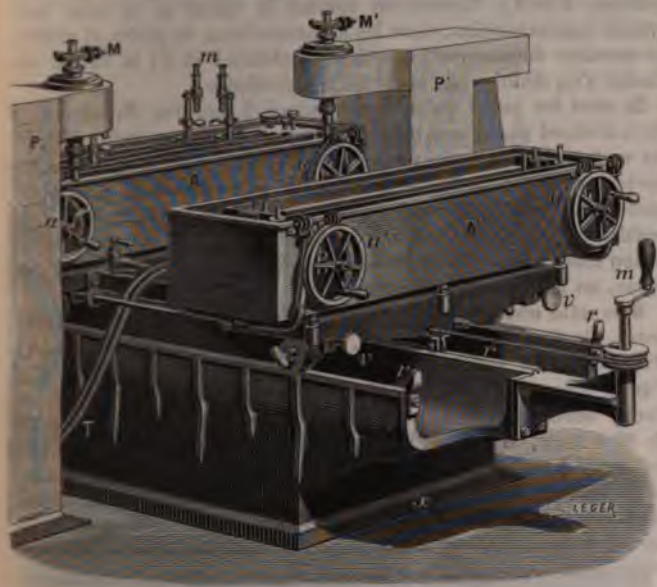


Fig. 77.

une copie à lui comparer dans l'autre, les réticules sont amenés en coïncidence avec les traits limites de la copie. Par le jeu de la manivelle *m* on substitue le second chariot au premier; par le mouvement des vis micrométriques *v* on achève la substitution. Il faut alors faire jouer les vis micrométriques des microscopes pour rétablir la coïncidence avec les images des traits. Ces déplacements micrométriques, joints à la tare, font connaître par leur valeur et leur sens la différence des longueurs des deux règles. Les auges sont fermées par des couvercles munis d'ouvertures convenables et renfermant de l'eau dont la température est indiquée par des thermomètres convenablement éclairés couchés sur des fourchettes à droite et à gauche des barres. De petits microscopes servent à ces lectures. On voit en *a*, *a'* les manivelles de commande des agitateurs. On expliquera plus loin comment le *comparateur* permet de mesurer les dilatations linéaires.

MESURE DES MASSES, DES POIDS ET DES FORCES.

89. **Définitions et généralités.** — Les masses et les poids peuvent être mesurés à l'aide d'un même instrument de précision, la *balance*, et par une même opération, la *pesée*. On sait, en effet, qu'il existe entre la masse M d'un corps et son poids P la relation générale $P = Mg$. Comme on connaît la valeur de g, avec une grande approximation, dans les différents lieux du globe, il suffira de mesurer *directement* l'une des grandeurs P et M; la valeur de l'autre s'en déduira par la formule précédente.

Ce sont les poids qu'on a commencé à mesurer directement. On a d'abord choisi une unité de poids, le *gramme*, unité dérivée du mètre. La méthode de mesure consiste à *faire équilibre* au poids inconnu X à l'aide d'un *poids marqué*, c'est-à-dire d'un poids connu, échantillonné d'avance en unités de poids. Soit P ce nombre de grammes : on a évidemment $X = P^g$, d'après la définition même de l'égalité des forces. Connaissant le poids P du corps, on en déduisait sa masse.

Mais cette unité de poids est elle-même un produit de deux facteurs, dont l'un, la masse M, est constant, et l'autre, l'accélération g, est variable avec la latitude : il s'ensuit donc que l'unité elle-même est variable avec la latitude. Un gramme de Paris, défini comme le poids d'un centimètre cube d'eau pure (à 4°) à Paris, n'est pas le même poids qu'un gramme de Lima qui serait défini de la même manière. Par conséquent deux pesées, faites l'une à Paris et l'autre à Lima, qui conduiraient au même nombre de grammes, ne seraient pas comparables. Inversement, deux pesées qui conduiraient à deux nombres différents pourraient correspondre à deux poids identiques. Par exemple, une masse d'or qui pèserait 1000^g à Lima (en grammes de Lima) pèserait à Paris

$$1000 \times \frac{980,96}{978,34} = 1002^g,678 \text{ (en grammes de Paris)}^1.$$

C'est pourquoi la Commission des unités C. G. S. a pris comme

1. 980,96 et 978,34 étant les valeurs de g à Paris et à Lima, on a, en appelant M la valeur constante de la masse d'or, p et p' ses poids différents à Lima et à Paris,

$$p = M \,.\, 978,34,$$
$$p' = M \,.\, 980,96,$$

d'où

$$\frac{p'}{p} = \frac{980,96}{978,34} \quad \text{et} \quad p' = p \cdot \frac{980,96}{978,34}.$$

nité fondamentale une *unité de masse*, la masse du gramme. On esure donc directement, à l'aide de la balance, la masse d'un rps en déterminant combien de fois elle vaut le gramme-masse : nombre M est un nombre invariable. On en déduit le poids, riable en chaque lieu du globe, en appliquant la formule $P = Mg$.

90. **Balances.** — 1° *Définitions.* — On nomme *balances* des struments qui servent à déterminer directement la masse des rps et indirectement leur poids. L'opération s'appelle *pesée* :

Fig. 78.

lle consiste à trouver une masse connue, graduée en grammes-nasse (*poids marqués*), qui ait *la même masse* que le corps.

On construit deux sortes de balances : les balances ordinaires, t des *balances* dites *de précision*.

2° *Description d'une balance ordinaire.* — La balance ordinaire (fig. 78) consiste en un levier du premier genre mn[1], nommé

1. Voir la théorie du levier, *Mécanique* Maneuvrier et Bergot.

fléau, aux deux extrémités duquel sont suspendus des *bassins* ou *plateaux* P, Q, de même poids, destinés à recevoir, l'un des objets à peser, l'autre des poids marqués. Le fléau est traversé en son milieu par un prisme d'acier, qu'on nomme *couteau*, dont l'arête vive constitue l'*axe de suspension* du fléau; elle repose à ses deux bouts sur deux pièces polies d'agate ou d'acier, qui constituent la *chape* : et ce dispositif diminue le frottement de l'axe. Aux extrémités du fléau sont adaptés deux prismes plus petits, dont les arêtes vives sont tournées en haut et sont parallèles à celles du couteau central. C'est sur ces arêtes que reposent, à l'aide de crochets, les plateaux P et Q. Il est indispensable que les trois arêtes vives *o*, *m* et *n* soient rigoureusement parallèles entre elles et qu'elles soient dans un même plan.

Enfin, à la partie supérieure du fléau et perpendiculairement à sa direction, est fixée une longue aiguille qui oscille devant un arc gradué *a*, fixe et porté par une colonne de laiton sur laquelle reposent la chape et le fléau.

Dans les balances les plus ordinaires, l'aiguille étant dirigée de bas en haut, a, par suite, un développement limité et décrit un arc de moyenne grandeur. Dans les balances actuelles, même peu précises, on tourne la pointe (fig. 84) en bas, ce qui donne à l'aiguille une plus grande longueur et un plus long parcours, et à la balance une sensibilité supérieure, car on peut observer ainsi de très petits déplacements du fléau.

On dit que la balance est *en équilibre*, lorsque l'aiguille s'arrête au zéro de l'arc gradué, ou lorsqu'elle oscille entre deux traits équidistants du zéro. Si la balance est bien construite et bien installée, la ligne des couteaux *m*, *o*, *n*, est alors une *droite horizontale*.

La colonne est portée par un pied à trois vis calantes, à l'aide desquelles on lui donne la position verticale.

3° *Boîtes de poids marqués.* — A chaque instrument est jointe une boîte, dite *boîte de poids*, contenant une série de masses (vulgairement, *poids marqués*) graduées en unités C. G. S., c'est-à-dire en grammes-masses.

Les poids usuels forment trois séries : les *gros poids*, qui vont du kilogramme à 50 kilogrammes; les *poids moyens*, du gramme au kilogramme, et les *petits poids*, du milligramme et de ses subdivisions au gramme. Les premiers ne sont pas utilisés dans les laboratoires : ils ne servent qu'aux usages industriels et commerciaux, dans les gros instruments de pesage, appelés *balances de magasin*, *balances de comptoir* et *balances-bascules*. Les autres séries servent pour les balances de laboratoire, et sont contenues dans les *boîtes de poids marqués*.

Les poids moyens sont de cuivre jaune et ont la forme de cylindre; quelques-uns aussi sont à godets, en forme de cône tronqué et rentrent les uns dans les autres. Les petits poids marqués sont en platine ou en cuivre jaune; ce sont généralement des plaques carrées, très minces, dont un des angles est

relevé, afin qu'on puisse les saisir avec des pinces. Une boîte de poids de laboratoire contient d'ordinaire plusieurs séries de quatre poids :

Poids moyens.	Série des unités.	2 poids égaux à	1g.	1 p. égal à	2g.	1 p. égal à	5g.
	Série des dizaines . . .	2 —	à 10g.	1 —	à 20g.	1 —	à 50g.
	Série des centaines . . .	2 —	à 100g.	1 —	à 200g.	1 —	à 500g

Il est facile de voir que chacune de ces séries fournit, par une association convenable, tous les poids de 1 jusqu'à 9, et leur ensemble tous les poids depuis 1g jusqu'à 999g. On a trois séries analogues pour les petits poids marqués, qui permettent toutes les combinaisons de poids depuis 0g,1 jusqu'à 0g,001.

Remarques. — I. La plupart des poids marqués qu'on trouve dans le commerce et dans les laboratoires ont été gradués en *grammes-poids* et non en *grammes-masse*. Mais, comme l'unité de masse C. G. S. est précisément la masse d'un corps qui pèse 1 gramme-poids métrique, il s'ensuit que les poids marqués, gradués en gramme-poids, permettent de déterminer directement les masses des corps pesés.

II. Tous les poids marqués sont censés *échantillonnés dans le vide* : cela veut dire qu'ils n'ont réellement leur valeur marquée qu'à la condition d'être employés dans le vide. Or, comme on fait toutes les pesées dans l'air, il en résulte une diminution dans la valeur de chaque poids marqué, à cause d'une poussée verticale que l'atmosphère exerce sur tous les corps qui y sont plongés.

4° *Conditions de justesse.* — Une balance ne peut servir à peser les corps avec exactitude qu'autant qu'elle est à la fois *juste* et *sensible*.

Définition de la justesse. — Une balance est dite *juste*, lorsque son fléau se maintient en équilibre, les plateaux étant vides ou chargés de poids égaux.

Énoncé des conditions. — Il y a deux conditions de justesse, nécessaires et suffisantes :

I. *Le centre de gravité de la partie mobile (fléau, plateaux et accessoires) doit être sur la verticale du point de suspension quand le fléau est en équilibre ;*

II. *Les deux bras du fléau doivent être rigoureusement égaux.*

Démonstration. — Si l'on conçoit un plan vertical qui passe par l'axe de symétrie du fléau, ce plan coupe les arêtes des trois couteaux aux points *o*, *m*, *n* (fig. 79). Le point *o* est appelé *point de suspension* ; les points *m* et *n*, *points d'attache*. C'est en ces points que doivent passer les résultantes du poids de la partie mobile et des poids placés dans les plateaux. Les *bras du fléau* sont les distances *om* et *on*.

Supposons les conditions de justesse remplies. On voit d'abord que, si les plateaux sont *vides*, *le fléau n'est sollicité* que par une seule *force*, *le poids* ϖ *de la partie mobile*. Ce poids est appliqué

au centre de gravité G, et il n'a d'autre effet que d'appuyer le fléau sur son support. On dit qu'*il est détruit par la résistance du support*. Le fléau se maintient donc nécessairement en équilibre.

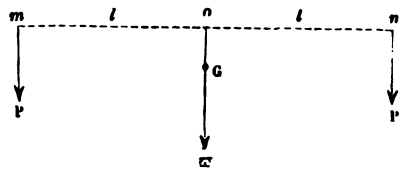


Fig. 79.

Si les plateaux sont chargés de poids égaux P, le fléau est soumis à trois forces parallèles. La force ϖ passe toujours par le point *o*. Les deux forces P ont une résultante parallèle, égale à leur somme et appliquée aussi au point *o*, puisque ce point divise en deux parties égales la distance *mn* de leurs points d'application. Toutes ces forces sont donc détruites par la résistance du support, et le fléau se maintient en équilibre.

Remarques. — I. *Utilité des couteaux*. — Il ne suffit pas que les bras du fléau soient égaux pendant qu'il est en équilibre, il faut aussi qu'ils restent égaux pendant ses oscillations. C'est pour satisfaire à cette condition qu'on fait reposer les plateaux sur deux prismes, dont les arêtes vives constituent, dans toutes les inclinaisons du fléau, les points d'attache des plateaux.

II. *Condition de commodité*. — A ces conditions on ajoute ordinairement la suivante : *le centre de gravité de la partie mobile doit être au-dessous de l'arête du couteau*. Mais ce n'est pas, à proprement parler, une *condition de justesse*; c'est plutôt une *condition de commodité*. Si elle n'était pas remplie, la balance n'en serait pas moins juste, mais elle ne serait pas d'un usage commode. En effet, si le centre de gravité était au-dessus de l'arête de suspension, le fléau ne pourrait prendre qu'un état d'équilibre instable (54), très difficile à établir et très facile à rompre. La moindre trépidation suffirait pour faire trébucher le fléau, même dans le cas où les plateaux seraient chargés de poids égaux : on dirait alors que la balance est *folle*. Si le centre de gravité coïncidait avec l'arête du couteau, l'effet de la pesanteur sur le fléau se trouvant détruit dans toutes les positions qu'on lui donne, il ne pourrait pas osciller, et ne ferait que prendre brusquement l'inclinaison maximum du côté où l'on mettrait le moindre excès de poids.

Si, au contraire, la condition précédente est remplie, il en résulte deux avantages : 1° quand les plateaux sont vides ou chargés de poids égaux, le fléau se maintient dans un état d'équilibre stable : on est toujours sûr de l'y amener au bout d'un temps plus ou moins long, qui dépend de la sensibilité; 2° quand les poids sont inégaux, le fléau penche vers le plus grand poids et il prend une nouvelle position d'équilibre, dont l'inclinaison est à peu près proportionnelle à la différence des poids.

5° *Conditions de sensibilité*. — *Définition de la sensibilité*. — On dit qu'une balance est *sensible*, lorsqu'elle accuse par une notable inclinaison du fléau une faible différence entre les poids qu'on veut comparer.

On juge de la sensibilité d'une balance par l'angle dont le fléau s'incline, ou plutôt par le déplacement de l'aiguille sur l'arc gradué pour une surcharge déterminée. Ainsi l'on dira qu'une balance est *sensible au milligramme*, si l'aiguille se déplace *visiblement* lorsque, après avoir réalisé l'équilibre, on vient à ajouter un milligramme dans l'un des plateaux.

Il faut distinguer la *sensibilité absolue* de la *sensibilité pratique*. La première caractérise l'instrument employé, la seconde dépend un peu de l'habileté de l'o[illegible] et beaucoup des procédés qu'il emploie pour apprécie[illegible]ments de l'aiguille.

Soit α l'angle dont s'incli[illegible]au pour une surcharge p, soit r la longueur de l'aiguille ; [illegible]ident que la *sensibilité absolue* est mesurée par

$$\frac{r\alpha}{p}.$$

On pourrait prendre pour sensibilité-type des balances celle, par exemple, d'une balance dont l'aiguille se déplacerait de 1 millimètre pour une surcharge de 1 milligramme.

Conditions. — Une balance est d'autant plus sensible, pour un même excès de poids mis dans l'un des plateaux :

1° *Que les bras du fléau sont plus longs.*

En effet, on a vu précédemment que la force qui fait incliner le fléau est l'excès de poids (P — Q) appliqué au bras du levier *od* ; mais celui-ci, qui est la projection de *om'* sur *om*, est d'autant plus grand, que le bras du fléau est plus long : donc l'action de (P — Q) croît avec la longueur du fléau.

2° *Que le poids de la partie mobile est moindre.*

3° *Que le centre de gravité du fléau est plus rapproché de l'axe de suspension.*

En effet, la résistance qui s'oppose à l'inclinaison du fléau est précisément le poids ϖ appliqué au bras de levier *oi*, et *oi* est la projection de *og'* (= *og*) : donc plus les quantités ϖ et *og* seront petites, plus la résistance à l'inclinaison sera faible.

Telles sont les conditions proprement dites de sensibilité. Pour que celle-ci reste indépendante de la charge totale, il faut encore réaliser la condition suivante :

4° *Les trois points de suspension des plateaux et du fléau doivent être en ligne droite.*

6° *Démonstration algébrique des conditions de sensibilité.* — I. *Cas d'un fléau droit.* — Soit α l'angle *mom'* (fig. 80), qui représente l'inclinaison du fléau, et p la différence P — Q des *poids placés dans les plateaux.*

La condition d'équilibre est exprimée par l'équation

$$[1] \qquad p.\,od = \varpi.\,oi.$$

Or le triangle rectangle *dom'* donne $od = om' \cos \alpha$, et le triangle *oig'* donne $oi = d \sin \alpha$. En substituant, on obtient

$$[2] \qquad pl \cos \alpha = \varpi d \sin \alpha, \quad \text{d'où} \quad \operatorname{tang} \alpha = \frac{pl}{\varpi d}. \qquad [2\ bis]$$

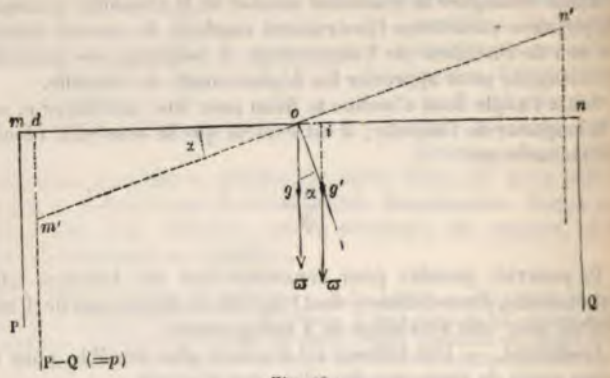


Fig. 80.

Or l'angle α est généralement assez petit pour qu'on puisse remplacer sa tangente trigonométrique par l'arc α, qui mesure l'inclinaison et, par suite, la sensibilité de la balance : on voit donc que la formule [2 *bis*] comprend les trois premières conditions.

Fig. 81.

La sensibilité est d'ailleurs indépendante de la charge totale, puisque celle-ci, $(2\,Q + p)$, n'entre pas dans la formule.

II. *Cas d'un fléau coudé.* — Supposons, par exemple, que l'angle β soit aigu (fig. 81) et adoptons les mêmes notations que dans le cas précédent. Soit α l'inclinaison du fléau *mon* sous l'influence de l'excès p. La condition d'équilibre est la même que précédemment.

Ici, les bras de levier ne sont plus les bras mêmes du fléau : ce sont leurs projections OI, OH et OK sur l'horizontale du point d'appui. L'équation est donc

$$(Q + p)\,OK = Q.\,OH + p.\,OI.$$

En remplaçant OK, OH et OI par leurs valeurs en fonction des éléments de la *balance*, il vient

$$(Q + p)\,l \sin(\beta - \alpha) = Q.\,l \sin(\beta + \alpha) + \varpi d \sin \alpha.$$

On en tire

$$\operatorname{tang} \alpha = \frac{pl \sin \beta}{(2Q + p)\, l \cos \beta + \varpi d}.$$

La présence du terme $(2Q + p)$ dans cette équation prouve que, lorsque le fléau n'est pas droit, la *sensibilité* n'est pas indépendante de la *charge totale* $(2Q + p)$.

On voit de plus que, dans le cas où nous nous sommes placés, c'est-à-dire lorsque β est aigu, la *sensibilité diminue* quand la *charge totale augmente*, parce que le coefficient $\cos \beta$ est > 0.

Au contraire, si β *était obtus*, comme le terme $(2Q + p)\, l \cos \beta$ serait alors < 0, la *sensibilité augmenterait* en même temps que la charge totale.

7° Remarques. — Pour que les conditions précédentes aient une efficacité réelle et durable, il faut, en outre, réaliser dans la construction de la balance les deux conditions mécaniques suivantes :

1° *Dans la limite de charge de la balance, le fléau doit rester inflexible*; car, s'il fléchit, non seulement son centre de gravité peut s'abaisser, mais encore les points d'attache des plateaux.

2° *Le frottement aux points d'appui du couteau et aux points d'attache des plateaux doit être le plus petit possible*. C'est pour obtenir ce résultat que, dans les balances de précision, on fait usage de chapes bien polies d'agate ou d'acier[1].

91. **Balances de précision : Conditions générales de construction.** — Les règles pratiques qui doivent diriger la construction de ces instruments se déduisent de la théorie exposée ci-dessus. On doit : 1° faire les deux bras du fléau rigoureusement égaux; 2° leur donner à la fois une grande longueur et une grande légèreté; 3° établir dans un même plan horizontal et dans des directions parallèles les trois axes de suspension du fléau et des plateaux; 4° placer le centre de gravité de la partie mobile au-dessous du point de suspension et plus ou moins près de lui, suivant le degré de sensibilité qu'on veut atteindre.

Malheureusement on ne peut dépasser certaines limites dans la réalisation simultanée de toutes ces conditions, parce qu'elles sont contradictoires dans une certaine mesure. Ainsi l'on ne peut pas allonger l sans augmenter ϖ. Et même les constructeurs sont arrivés, empiriquement, à cette conclusion que, afin de ne pas compromettre la rigidité des fléaux, on doit faire augmenter ϖ plus rapidement que l; aussi la tendance actuelle est-elle dans la construction des balances à court fléau : tel est le dernier modèle de balance de Collot que nous décrirons ci-dessous.

Au point de vue pratique on peut dire que, si les arêtes des couteaux étaient bien vives et si les plans d'agate étaient parfaitement polis, la sensibilité n'aurait pas de limite, à la condition qu'on employât un procédé optique convenable pour apprécier les plus infimes déplacements de l'aiguille indicatrice. En effet, tout frottement étant supprimé, à une surcharge p, si petite qu'elle soit, correspondrait un déplacement qui lui serait proportionnel. En réalité, la sensibilité est limitée; mais l'on pourrait facilement peser, avec une bonne balance, le *centième de milligramme*, si l'on n'avait à craindre qu'une pareille

1. Dans les balances qu'on construit actuellement on a renoncé à l'emploi de l'acier, afin d'éviter les attractions magnétiques.

pesée ne fût faussée par le plus léger accident, par exemple par la chute du moindre grain de poussière sur l'un des plateaux.

On se contente donc ordinairement d'apprécier le *vingtième* de milligramme. On peut y atteindre par deux procédés.

1° Supposons qu'on ait une balance quelconque, mais bien construite et munie d'un arc finement divisé, ainsi que d'une aiguille dont l'extrémité soit amincie au point d'être à peine visible à l'œil nu. On disposera à l'intérieur de la balance une lentille à court foyer, destinée à fournir une image très agrandie de la graduation et de la pointe indicatrice; puis on observera cette image à l'aide d'une lunette à réticule, placée à 0m,50 de la balance, qui permettra d'apprécier nettement les plus petits déplacements.

Fig. 82.

2° Un procédé plus parfait est réalisé à l'aide d'un dispositif spécial, adopté dans les balances de la maison Collot (fig. 82).

L'aiguille porte, sur sa partie inférieure, un anneau traversé par un fil très fin *f* (fig. 83), dirigé dans l'axe même de l'aiguille. On l'éclaire vivement en y concentrant les rayons d'une source de vif éclat et de petites dimensions, qui est parfaitement réalisé par une petite lampe électrique à incandescence S. Le faisceau lumineux tombe ensuite sur un système optique, constitué par un objectif de microscope, lequel produit une image très agrandie du fil; celle-ci vient se projeter sur un petit écran E en verre dépoli, muni d'une échelle divisée.

Fig. 83.

Remarque. — On dispose habituellement l'appareil de manière que *une* division de l'arc ordinaire (1 millimètre environ) corresponde à une surcharge de 4 milligrammes, et *une* division de l'échelle sur verre dépoli à 1/5 de milligramme. Cela permet d'abréger considérablement les pesées de précision[1].

92. Balance de Collot. — La figure 84 montre une balance de précision construite par la maison Collot, et qui permet de faire couramment des pesées *au vingtième de milligramme*. Afin de la garantir de la poussière et de la préserver de l'action oxydante de l'air humide et aussi des agitations de l'air pendant la pesée, on l'enferme dans une cage de verre dont la face antérieure s'ouvre à volonté pour permettre d'opérer les pesées[2]. La tablette qui porte l'instrument est indépendante de la cage, ce qui permet d'ouvrir ou de fermer celui-ci sans faire bouger le fléau.

1. On peut démontrer, en effet, que si l'on fait varier la sensibilité d'une balance en modifiant la distance du centre de gravité, la durée des oscillations est à peu près proportionnelle à la racine carrée de la sensibilité. Et comme la *sensibilité absolue* a été réduite dans le rapport de 1 à 20 sans changement dans la *sensibilité pratique*, on voit que la durée des oscillations a été, du même coup, rendue 4 à 5 fois plus petite.

2. *Cette face n'a pas été représentée dans le dessin, afin de n'en pas masquer les détails.*

1. *Fléau.* — Deux montants de fonte A et A, placés symétriquement, se ter-
ment chacun par un double bras oblique; ces deux bras se réunissent en
rme d'angle pour supporter un plan d'agate *a* sur lequel s'appuie le couteau
ntral du fléau *aa*. Ce fléau a été taillé dans une règle plate de bronze en
rme de losange allongé. Pour en diminuer le poids, on y a pratiqué de larges
ailles qui ne laissent subsister que les côtés du losange. On a ainsi un fléau
ger, qui conserve une résistance à la flexion d'autant plus grande que c'est un
au court par rapport à ceux des anciennes balances de précision. Son axe
suspension est réalisé d'une manière très précise à l'aide d'un prisme trian-

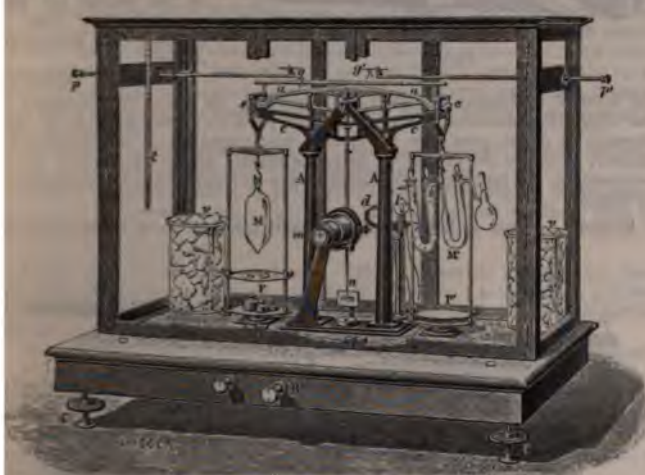


Fig. 84.

laire d'acier trempé, ou mieux d'agate, qu'on y a encastré perpendiculaire-
ent en son milieu, et dont l'arête inférieure, bien rectiligne, s'appuie sur le
an d'agate du support.

Fourchette. — A chaque extrémité du fléau est fixé un prisme semblable au
écédent, mais l'arête en dessus, destiné à supporter un plan d'agate auquel est
spendu chaque plateau au moyen d'un étrier *e* (fig. 86). Si ces prismes res-
ient en contact avec les plans d'agate, leurs arêtes s'émousseraient, et la ba-
nce perdrait de sa sensibilité. On évite cet inconvénient à l'aide de la *four-
ette*, pièce mobile, qui permet de soulever les plateaux et le fléau toutes les
is que la balance ne fonctionne pas.

C'est une pièce de fonte *c*, *c*, aussi longue que le fléau, qu'on élève ou
l'on abaisse à frottement doux entre les doubles bras obliques du support
ntral, à l'aide de deux tiges qui traversent les montants et que l'on peut
anœuvrer de l'extérieur. Le bouton B sert au soulèvement du fléau, et le
uton B' sert, par un mécanisme analogue, au soulèvement des plateaux sur
eux supports mobiles placés en dessous.

La figure 85 représente un mécanisme analogue à celui qui commande la four-
ette. Il se compose d'un levier *ab* placé sous la tablette. Ce levier, mobile
tour d'un axe horizontal A, est *articulé par un bout à une tige D* reliée à la

fourchette et la faisant marcher; de l'autre, il porte un appendice *a* sur lequel presse une pièce cylindrique C entaillée en hélice à sa base. On fait tourner cette pièce à l'aide du bouton B. Lorsque le bord incliné de la pièce C vient presser sur l'appendice *a* et l'abaisse, la tige D est soulevée et avec elle la fourchette. Si l'on tourne en sens contraire, la tige D s'abaisse et la fourchette descend.

Fig. 85.

Sur l'arête inférieure du fléau et au-dessous du point de suspension, on a fixé verticalement et sur l'aiguille indicatrice une vis à pas très petit. Un bouton fileté *s* (fig. 86), taraudé en écrou, peut être mû sur la vis; quand on le fait monter ou baisser, le centre de gravité de la partie mobile monte ou descend sur la verticale, ce qui fait augmenter ou diminuer en même temps la sensibilité de la balance.

Remarque. — Dans la balance Collot on peut agir également sur le centre de

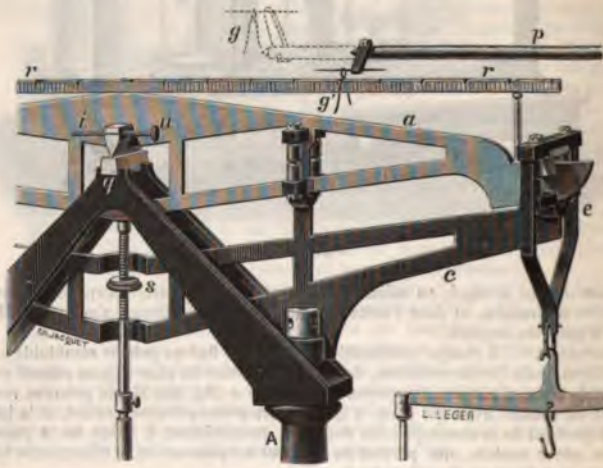


Fig. 86.

gravité pour l'amener exactement dans le plan de symétrie de l'instrument. Pour cela on n'a qu'à agir sur la vis *ni* (fig. 86) qui traverse le couteau central, de manière à l'enfoncer plus ou moins.

Poids marqués de précision. — Aux balances de précision sont jointes nécessairement des boîtes de poids parfaitement justes. Dans les séries des sous-multiples du gramme (décigramme, centigramme, milligramme) on substitue d'ordinaire un poids 2 à un poids 1, parce que le poids 2 est plus maniable que

le poids 1 : c'est un avantage pratique sensible, à cause de l'extrême petitesse de ces poids, qui vont jusqu'au *dixième de milligramme*.

On évite encore mieux cette difficulté de maniement, pour les fractions de milligramme, en employant à leur place de petits cavaliers g, g' formés d'un fil de platine, pesant exactement 1^{mg} (fig. 86). On les fait glisser sur une règle plate métallique r, r, fixée au-dessus du fléau, parallèlement à sa direction.

La règle est partagée en dix parties égales, marquées par des crans dont le premier est sur la verticale du point de suspension et les derniers sur les verticales des points d'attache m_1, m et n_1, n. D'après la théorie du levier, un cavalier de 1 centigramme, placé au dernier cran, c'est-à-dire à l'une des verticales m ou n, pèsera sur le plateau de tout son poids; placé sur la verticale du milieu du bras Om, le cavalier n'exercera plus sur le plateau qu'un effort de 1/2 centigramme, c'est-à-dire de 5^{mg}; placé au premier cran, à partir du point O_1, il pèsera sur le plateau comme 1/10 de centigramme, ou 1^{mg} : en un mot, le cavalier, qu'on déplace sur le fléau, *exerce un effort proportionnel à sa distance à l'axe de suspension*.

Ces cavaliers peuvent être maniés de l'extérieur de la cage : les tiges latérales pq, $p'q'$ permettent de les saisir par la boucle supérieure.

Dans les anciennes balances de précision, l'écrou régulateur de la sensibilité était placé au-dessus du fléau, ce qui gênait la manœuvre des cavaliers. Dans la balance Collot, on voit que rien n'empêche au contraire de faire passer un cavalier d'un côté à l'autre du fléau.

Limite de précision de la balance. — Les balances de précision qui sont sensibles au milligramme pour une charge totale de 1 kilogramme, sont des instruments de construction courante : or elles sont déjà sensibles au *millionième*.

Deleuil a jadis construit pour Regnault une balance sensible à 1^{mg}, sous une charge de 10 kilogrammes[1] ; la sensibilité était donc de $\frac{1}{10^7}$.

On a poussé la précision beaucoup plus loin au Bureau international des poids et mesures. En prenant certaines précautions, et en observant à distance des balances dont la cage ne s'ouvrait pas, on est arrivé à peser 100 kilogrammes à 1^{mg} près, c'est-à-dire avec une précision de *un cent-millionième*.

93. Différentes méthodes de pesée. — On peut effectuer la pesée d'un corps par trois méthodes :

La *simple pesée*, employée pour les mesures courantes; la *double pesée* et la méthode *de transposition*, employées pour les mesures de précision.

1° *Simple pesée.* — Elle consiste tout simplement à mettre le corps dans l'un des plateaux et des poids marqués dans l'autre, jusqu'à ce que l'aiguille revienne au zéro. Soit X le corps à peser et P la somme des poids marqués, on a l'équation d'équilibre

$$Xl = Pl, \qquad \text{d'où} \qquad X = P.$$

Cette méthode suppose essentiellement que les bras du fléau soient rigoureusement égaux : aussi emploie-t-on de préférence l'une des deux méthodes suivantes, qui ne supposent pas cette condition remplie[1].

1. *Toutefois, lorsqu'on a à effectuer une série de pesées se rapportant à une*

2° *Double pesée.* — Cette méthode s'appelle encore *méthode de Borda*, du nom du physicien qui l'a indiquée le premier. Elle consiste en deux pesées simples successives. On place le corps dont on veut connaître le poids dans l'un des plateaux, et on lui fait équilibre, dans l'autre, avec de la grenaille de plomb ou du sable[1] : c'est ce qui s'appelle *faire la tare*; puis on enlève du premier plateau le corps à peser, et on le remplace par des poids marqués jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse de nouveau. La somme de ces poids représente exactement le poids du corps; car, dans ces deux opérations, le corps et les grammes agissent tour à tour sur le même bras de levier pour faire équilibre à la même résistance. On s'en rend compte plus nettement en écrivant les équations qui expriment ces deux équilibres successifs. Soient l et l' les deux bras du fléau, T le poids de la tare, P la somme des poids marqués et X le poids du corps. On a successivement

$$[1] \qquad Xl = Tl', \qquad [2] \qquad Pl = Tl'.$$

En divisant membre à membre, il vient $X = P$.

même expérience, et lorsque les poids n'interviennent que par leurs rapports, la condition d'égalité des bras du fléau devient superflue, et l'on peut employer « la simple pesée », plus expéditive que toute autre méthode.

Exemple d'une pesée simple de précision. — La figure 84 a été dessinée pendant l'une des pesées effectuées, au Laboratoire des recherches physiques, par M. A. Leduc, maître de conférences à la Faculté des Sciences, pour déterminer la composition de l'eau.

On voit, à droite, le petit appareil qui sert à recueillir l'eau formée dans la réduction de l'oxyde de cuivre par l'hydrogène pur et sec; de l'autre côté est suspendue une ampoule de verre fermée, ayant exactement le même volume extérieur que cet appareil. La tare est complétée au moyen de poids marqués, visibles sur le plateau de gauche.

Dans l'une des pesées, la tare se composait, *avant* l'expérience, de 98gr,915, et le cavalier se trouvait à la division 22 du même côté :

donc tare totale = 98gr,9172.

Après l'expérience, la nouvelle tare était de 125gr,915, et le cavalier était à la division 11 :

donc tare totale = 125gr,7161.

Le poids brut de l'eau recueillie était donc 22gr,1553.

Parmi les corrections qu'on doit faire subir à ce poids brut, signalons seulement la plus importante, la réduction du vide, qui s'élevait à 0gr,02604.

1. Dans les pesées de précision on emploie pour faire la tare des poids marqués *ordinaires*, qui ont l'avantage de ne pas salir les plateaux.

3° *Méthode de transposition* [1]. — On pèse deux fois le corps par *simple pesée*, en le plaçant successivement dans chacun des plateaux.

Écrivons les deux équations d'équilibre ; soient X le point cherché, P le poids marqué mis dans l'autre plateau, l et l' les longueurs des bras de levier qui leur correspondent respectivement. La première équation d'équilibre est

$$[1] \qquad lX = l'P.$$

De même si l'on représente par P' le nombre des grammes qui font équilibre au corps après l'avoir changé de plateau, on a

$$[2] \qquad l'X = lP'.$$

Multipliant membre à membre les égalités [1] et [2], et supprimant le facteur commun ll', on a

$$X^2 = PP', \qquad \text{d'où} \qquad X = \sqrt{PP'}.$$

Donc le poids cherché *est la moyenne proportionnelle* entre les poids P et P'.

Remarque. — En divisant les deux équations membre à membre, on aurait

$$[3] \qquad \frac{l}{l'} = \frac{P}{P'}.$$

Cette égalité donne le rapport des longueurs des bras en fonction des deux poids, — ce qui permettrait de mesurer ce rapport.

Si P = P', on a $l = l'$: de là un procédé pour vérifier l'une des conditions de justesse de la balance, en supposant que l'autre soit remplie.

1. On n'emploie guère cette méthode que dans le cas où l'on n'a pas à sa disposition de tare convenable pour faire la double pesée.

LIVRE III

HYDROSTATIQUE

CHAPITRE PREMIER

CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES LIQUIDES.

94. Hydrostatique et hydrodynamique. — L'*hydrostatique* est la science qui a pour objet les conditions d'équilibre des liquides et les pressions qu'ils exercent, par suite de leur poids, soit dans l'intérieur de leur propre masse, soit sur les parois des vases qui les contiennent.

La science qui traite du mouvement des liquides se nomme *hydrodynamique*[1].

95. **Compressibilité des liquides.** — D'après une ancienne expérience de Bacon et des académiciens de Florence, on a regardé longtemps les liquides comme complétement incompressibles. Depuis, des recherches sur le même sujet ont été faites par plusieurs physiciens, et tous ont constaté que les liquides sont plus ou moins compressibles. Nous résumerons ci-dessous l'état de cette question.

Remarque. — *Élasticité des liquides.* — Quelle que soit la compression à laquelle on ait soumis un liquide, l'expérience fait voir qu'aussitôt que l'excès de pression cesse, le liquide revient exactement à son volume primitif; d'où l'on conclut que les liquides sont *parfaitement élastiques.*

96. **Principe d'égalité de pression ou principe de Pascal.** — *Énoncé.* — En regardant les liquides comme parfaitement élastiques, doués d'une fluidité parfaite, et en les supposant soustraits à l'action de la pesanteur, on a été conduit au principe suivant, connu sous le nom de *principe d'égalité de pression* :

Si l'on exerce une pression quelconque à la surface d'un liquide

1. L'application de celle-ci à l'art de *conduire et d'élever les eaux* se désigne spécialement sous le nom *d'hydraulique.*

en équilibre, cette pression se transmet intégralement dans tous les sens à toute portion plane de paroi égale à la surface pressée[1].

Interprétation. — Concevons un vase de forme quelconque, rempli d'eau ou de tout autre liquide dont nous négligerons le poids, et muni sur ses parois de diverses tubulures cylindriques A, B, C..., de même section, fermées par des pistons mobiles (fig. 87). Si sur le piston supérieur A on exerce, de dehors en dedans, une pression quelconque, de 20 kilogrammes par exemple, instantanément cette pression se transmet sur la face interne des pistons B, C, D..., qui tous sont poussés de dedans en dehors avec une force de 20 kilogrammes. Les pressions transmises seraient de 40, 60 kilogrammes, si les surfaces étaient deux ou trois fois plus grandes que celle du piston A.

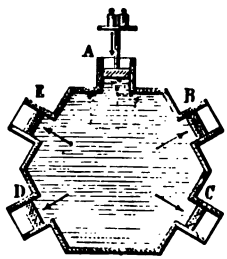


Fig. 87.

Expression numérique. — Soient S et s les surfaces du grand et du petit piston, on peut poser

$$[1] \quad \frac{P}{p} = \frac{S}{s}, \qquad \text{d'où} \qquad [2] \quad \frac{P}{S} = \frac{p}{s}.$$

97. **Généralisation du principe de Pascal.** — 1° Dans l'égalité [2], le quotient $\frac{P}{S}$ représente *la pression moyenne par unité de surface* sur la portion de paroi constituée par le grand piston; de même $\frac{p}{s}$ représente *la pression moyenne par unité de surface* sur le petit piston. Sur une autre portion plane quelconque de paroi s', la pression totale serait, par exemple, p', *la pression moyenne par unité de surface* serait $\frac{p'}{s'}$, et l'on aurait encore $\frac{P}{S} = \frac{p'}{s'}$. Cela veut dire que, *dans un liquide en équilibre sous la seule*

1. On l'appelle aussi *principe de Pascal*, parce qu'il fut énoncé pour la première fois par Pascal, sous la forme suivante : *Si un vaisseau plein d'eau, clos de toutes parts, a deux ouvertures dont l'une soit centuple de l'autre, en mettant à chacune un piston qui lui soit juste, un homme poussant le petit piston égalera la force de cent hommes qui pousseront celui qui est cent fois plus large et en surmontera quatre-vingt-dix-neuf.*

Ce deuxième énoncé conduit directement à l'interprétation pratique de noncé précédent, lequel est plus général.

le pressions extérieures, la pression moyenne par unité est la même en tous les points de la paroi du vase qui

, le principe s'applique, sous ces différentes formes, nent aux parois du vase qui contient un liquide parfait re, mais encore aux molécules ce liquide. Ainsi, une tranche fig. 88), formée de molécules t prise en un point quelcon- masse, subit une pression nelle à sa surface, tout comme n égale de paroi.

Fig. 88.

en un point. — Ce terme ent employé en hydrosta d'en préciser le sens. E pas de pression *en un* on ne peut s'exercer q ne portion de paroi oins petite, mais de gr appréciable et déter-

on en un point, dans le cas où la pression est uniforme, *ssion par unité de surface autour du point considéré.*

$= \varpi$: on en déduit $P = \varpi S$.

— 1° *Cas des parois courbes.* — La notion de pression en un point aux parois courbes. Il suffit d'imaginer le plan tangent au point la surface courbe; sur ce plan, on prend, int, un élément ω qui supporte une pres- aire p. Le quotient $\frac{p}{\omega} = \varpi$ est la pres- é de surface) au point considéré.

'a masse liquide. — Enfin, la même défi- ique aussi à un point quelconque pris ur de la masse liquide. Il suffit, pour la de répéter le raisonnement qui nous a ut pour généraliser le principe de Pascal.

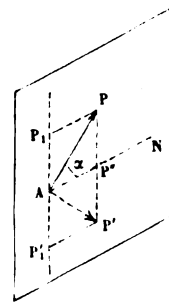


Fig. 89.

ction des pressions. — Toutes ıs qui s'exercent soit dans l'inté- liquide en équilibre, soit sur les ase qui le contient, sont des forces c'est-à-dire perpendiculaires aux essées.

considérer ce fait comme une conséquence de la flui- te des liquides et de leur symétrie absolue autour quelconque. En *effet, si en un point A nous* supposons

une pression P inclinée d'un angle α sur la normale AN, il doit exister, par raison de symétrie, une autre pression P', inclinée du même angle et en sens contraire. On peut (fig. 89) décomposer chacune de ces forces en deux composantes, l'une normale et l'autre dirigée dans le plan de la surface pressée. Les deux composantes AP et AP' sont égales et opposées : elles se détruisent. Les composantes normales sont égales et de même sens : elles s'ajoutent pour exercer une pression normale au point où elles sont appliquées. Ce sont les seules forces qui produisent un effet utile; ce sont les seules dont on ait à tenir compte dans l'étude des liquides en équilibre.

99. **Presse hydraulique.** — 1° *Définition.* — Le principe d'égalité

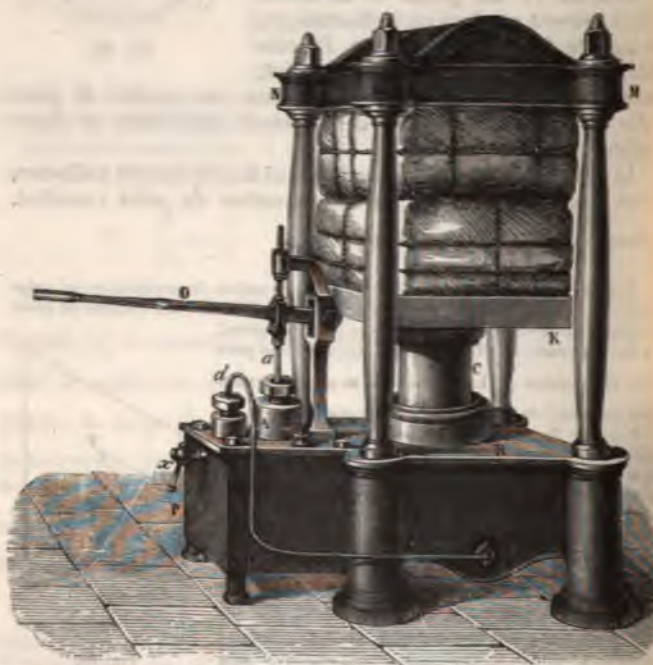


Fig. 90.

de pression a reçu une importante vérification expérimentale et, *du même coup*, une très utile application dans la presse hydrau-

lique. C'est un appareil qui sert à produire des pressions considérables à l'aide d'un effort relativement très faible. Il fut imaginé par Pascal, mais ne fut construit pour la première fois qu'en 1796, par l'ingénieur anglais Bramah.

2° *Description*. — L'appareil est fait tout en fonte (fig. 90 et 91). Dans un corps de pompe B, à grand diamètre et à parois très résistantes, on peut faire monter et descendre à frottement doux un cylindre C faisant l'office de piston. A celui-ci est fixé un plateau K, qui monte et descend avec lui entre quatre colonnes. Ces dernières supportent un plateau MN qui est fixe, et c'est entre ce

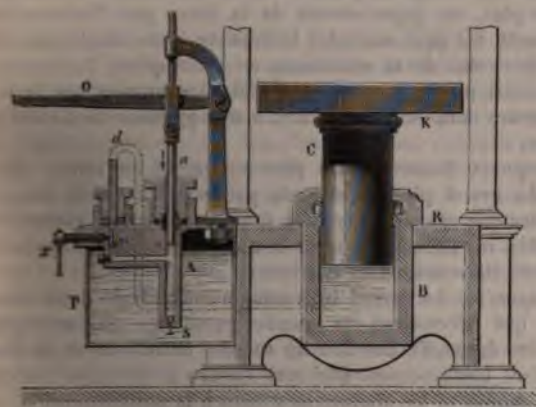


Fig. 91.

plateau et le plateau K que sont placés les objets qu'on veut mettre en presse. L'ascension du piston C s'obtient à l'aide d'une *pompe d'injection* A, qui aspire l'eau d'un réservoir P, et la refoule dans le cylindre B. On manœuvre le piston *a* de cette pompe à l'aide d'un levier O. Lorsque le piston s'élève, la soupape S s'ouvre et l'eau s'introduit dans le corps de pompe A; puis, quand il redescend, cette soupape se ferme, et une seconde soupape *m*, qui était fermée pendant l'ascension du piston, est soulevée actuellement par la pression de bas et haut qu'elle subit, et l'eau est refoulée par le tube *d* jusque dans le corps de pompe B.

La filtration de l'eau entre le piston et le cylindre est évitée à l'aide du *cuir embouti*. On nomme ainsi un cuir épais, imbibé d'huile et imperméable à l'eau, et qui, recourbé en forme d'U renversé (fig. 92), s'enroule *circulairement* dans une cavité

pratiquée au haut de la paroi du corps de pompe. Plus l'eau est comprimée dans celui-ci, plus elle applique fortement le cuir, d'un côté sur la paroi du corps de pompe, de l'autre sur le piston C.

Fig. 92.

3° *Fonctionnement.* — La pression qu'on peut obtenir au moyen de la presse hydraulique dépend du rapport de la section du piston C à celle du piston *a*. Si la première est 100 fois plus grande que la seconde, la pression supportée de bas en haut par le grand piston sera 100 fois celle exercée par le petit. De plus, on gagne encore de la force par l'intermédiaire du levier O. Si, par exemple, le bras de levier de la puissance égale 5 fois celui de la résistance, on quintuplera l'effort appliqué au petit piston : un effort de 30 kilogrammes sur le levier correspondra donc sur le piston C à une pression de 15 000 kilogrammes.

Remarquons d'ailleurs que plus on gagne en force, plus la course du grand piston est lente par rapport à celle du petit : c'est-à-dire que *ce qu'on gagne en force on le perd en vitesse*. C'est là, en effet, un principe général de mécanique, dont l'application se retrouve dans toutes les machines.

4° *Usages.* — La presse hydraulique est utilisée dans tous les travaux qui nécessitent de grandes pressions, par exemple le foulage des draps, l'extraction du suc des betteraves et de l'huile des graines oléagineuses. Elle sert encore à éprouver les chaudières à vapeur et les chaînes destinées à la marine, etc.

100. **Presses de Desgoffe et de Cailletet.** — M. Desgoffe a apporté à la construction de la presse hydraulique deux notables perfectionnements.

On peut injecter directement de l'eau sous le grand piston, de manière à produire des accroissements de pression brusques.

2° Quand la limite de pression est atteinte, il est possible de la dépasser, au moyen d'un piston plongeur, qu'on peut introduire plus ou moins profondément dans le corps de pompe et qu'on manœuvre de l'extérieur, à l'aide d'une grande roue R à manivelles.

Les mêmes perfectionnements se trouvent dans l'appareil de M. Cailletet pour la liquéfaction des gaz réputés permanents.

CHAPITRE II

PROPRIÉTÉS DES LIQUIDES PESANTS EN ÉQUILIBRE

PRESSIONS SUR LES PAROIS DES VASES. — PRESSIONS SUR LES CORPS IMMERGÉS. — CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES LIQUIDES PESANTS.

101. **Existence des pressions dans les liquides pesants en équilibre.** — Les liquides, comme tous les autres corps, sont *pesants*, c'est-à-dire soumis à l'action de la pesanteur, à la surface de la terre. En hydrostatique, on appelle plus particulièrement *liquides pesants* les liquides que l'on considère comme n'étant soumis à d'autres forces extérieures que celles de la pesanteur. Dans un liquide pesant en équilibre, le poids seul des molécules suffit pour développer des pressions qui se transmettent et s'exercent dans tous les sens, soit dans l'intérieur de la masse, soit sur les parois du vase, et toujours normalement à la surface pressée. Il est facile de constater par l'expérience l'existence de ces pressions.

Pression verticale de haut en bas. — La pression verticale de haut en bas résulte directement du poids des molécules liquides accumulées. Pour la mettre en évidence, il suffit de verser un liquide quelconque dans un vase cylindrique en verre, fermé par un fond horizontal mobile, qui serait par exemple une soupape s'ouvrant de haut en bas. On verra la soupape céder à la pression dès que la quantité de liquide versée sera suffisante.

Fig. 93.

Poussée. — Expérience de l'obturateur. — La pression que les couches supérieures d'un liquide exercent sur les couches inférieures fait naître dans celles-ci une *réaction verticale de bas en haut*, qui est une conséquence du principe de Pascal. Cette pression constitue la *poussée des liquides*. Elle est très sensible lorsqu'on plonge la main dans *un liquide, surtout s'il* a une grande

densité, comme le mercure. On peut la constater et la mesurer par l'*expérience de l'obturateur.*

L'appareil se compose d'un large tube en verre A, ouvert à ses deux extrémités (fig. 93). Le bord inférieur est rodé horizontalement et l'on peut le fermer hermétiquement en y appliquant soit un disque de verre poli O, lequel constitue l'*obturateur*, soit tout simplement une carte mince, de poids négligeable. On plonge l'appareil dans l'eau, en soutenant l'obturateur par un fil attaché en son milieu, et on lâche le fil dès que l'immersion est assez profonde. L'obturateur reste alors appliqué contre le tube, ce qui indique qu'il supporte, de bas en haut, une pression supérieure à son poids. On pourrait évaluer approximativement cette pression, soit en versant lentement de l'eau sur l'obturateur, soit en le chargeant de poids marqués, jusqu'à le détacher du tube.

Pressions obliques. — On constaterait de même l'existence de pressions obliques ou verticales, en appliquant l'obturateur sur des tubes dont le bord inférieur serait orienté et rodé suivant des directions quelconques.

102. Théorème fondamental. — La transmission de ces pressions dans les liquides pesants en équilibre se fait d'après la loi suivante :

La différence des pressions en deux points quelconques d'un liquide pesant en équilibre est égale au poids d'un cylindre du liquide ayant pour base l'unité de surface et pour hauteur la distance verticale de ces deux points.

Cette loi est le fondement de la théorie de l'équilibre des liquides pesants. On peut la considérer soit comme un principe analogue au principe de Pascal, c'est-à-dire l'admettre *a priori* et la vérifier dans ses conséquences, soit comme un théorème de mécanique et la démontrer par le raisonnement. Nous procéderons des deux manières successivement.

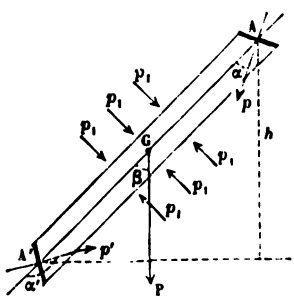


Fig. 94.

103. Démonstration du théorème fondamental. — Soient A et A' les deux points, l leur distance et h leur distance verticale, ϖ et ϖ' les pressions (définies comme ci-dessus), et d le poids de l'unité de volume du liquide.

Prenons autour des points A et A', dans des directions quelconques, des *tranches élémentaires* de liquide. Comme elles sont en équilibre, nous pouvons les solidifier par la pensée (fig. 94). Soit

es qu'exerce à sa surface le liquide ambiant. On démontre en méca-
que, dans le cas général, il y a six conditions d'équilibre. Une seule
elles nous suffira ici pour les besoins de la démonstration. Nous expri-
s que, si l'on projette toutes les forces du système sur une droite quel-
, par exemple sur l'axe AA' du cylindre, *la somme algébrique de ces*
ions doit être nulle.

es forces sont :

e poids P du filet, appliqué en son centre de gravité G, et faisant un
avec l'axe de figure. Il est égal à σld, ou à $\frac{\sigma hd}{\cos\beta}$, en remarquant que
$\frac{h}{\cos\beta}$;

pression élémentaire p, qui fait un angle α avec AA'; elle est égale
ou à $\frac{\omega\sigma}{\cos\alpha}$, en remarquant que $\omega = \frac{\sigma}{\cos\alpha}$;

pression élémentaire p, qui fait un angle α' avec AA'; elle est égale
u à $\frac{\omega'\sigma}{\cos(180^\circ - \alpha')}$, car $\omega' = \frac{\sigma}{\cos(180^\circ - \alpha')}$;

s pressions latérales, $p_1, \ldots, p_n$, qui sont normales à la surface du
e, et par conséquent perpendiculaires à l'axe.

obtenir les projections de toutes ces forces, il suffit de multiplier cha-
'elles par le cosinus de l'angle qu'elle fait avec la direction AA'.

ainsi l'équation d'équilibre

$$P\cos\beta + p\cos\alpha + p'\cos\alpha' = 0.$$

les β et α étant aigus, l'angle α' est obtus; son cosinus est donc négatif.
ce signe en évidence, en remplaçant $\cos\alpha'$ par le cosinus du supplé-
On a

104. Conditions d'équilibre d'un liquide pesant. — Citons comme exemple les conditions d'équilibre d'un liquide pesant.

Il y en a deux, l'une tout à fait générale et l'autre particulière au cas où le liquide a une surface libre. (On appelle *surface libre* d'un liquide sa surface terminale dans l'air ou dans le vide.)

1° *La pression doit être la même en tous les points d'un même plan horizontal, pris à un niveau quelconque dans le liquide.*

2° *La surface libre du liquide doit être plane et horizontale.*

En effet, soient p et p' les pressions en deux points quelconques pris sur un même plan horizontal. On a entre p et p' la relation $p' = p + zd$; et puisque $z = 0$, $p' = p$.

Réciproquement, si les pressions p et p' sont égales en deux points quelconques d'une surface, prise dans un liquide pesant, la relation générale, qui peut s'écrire $zd = p' - p$, se réduit à $zd = 0$. Comme d n'est pas nul, on en conclut que $z = 0$; donc les points sont sur un même plan horizontal.

Or la surface libre supporte nécessairement en tous ses points la même pression : donc elle forme un plan horizontal.

PRESSIONS SUR LES PAROIS DES VASES.

105. Pressions sur le fond plan et horizontal d'un vase. — THÉORÈME. — *Dans un liquide pesant en équilibre, les pressions sur le fond plan et horizontal du vase ont une résultante unique, verticale et dirigée de haut en bas, égale au poids d'un cylindre du liquide ayant pour base le fond et pour hauteur sa distance à la surface libre. Elle est appliquée au centre de gravité de la surface du fond.*

La proposition n'est rigoureusement vraie que dans le cas du vide. Dans le cas ordinaire, où le liquide se trouve dans l'air ou dans un gaz, sa surface libre supporte une pression. Il faut alors ajouter au poids du cylindre liquide la pression exercée par le gaz sur une portion de la surface libre égale au fond du vase.

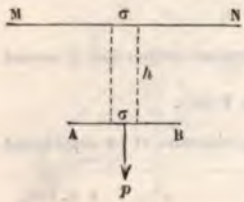


Fig. 95.

Démonstration. — Soit AB le fond plan et horizontal; soit MN la surface libre. Sur chacun des éléments de surface, tels que σ, s'exerce une pression élémentaire p. Toutes ces pressions, étant verticales, ont une résultante égale à leur somme et appliquée *au centre des forces parallèles* de AB (fig. 95). Or, en un point de l'élément, la *pression* ϖ *est égale à* $\varpi' + hd$, ϖ' étant la pression que l'atmosphère exerce en

au point de la surface libre et h la distance de ce niveau au fond. On a donc

$$p = \varpi'\sigma + \sigma hd$$

et

$$P = \sum (p) = \sum \varpi'\sigma + \sum hd\sigma = \varpi' \sum \sigma + hd \sum \sigma;$$

$\sum (\sigma)$ est égal à la surface S du fond. On a donc enfin

$$P = S\varpi' + Shd.$$

Le terme $S\varpi'$ représente la pression de l'atmosphère sur une surface égale à celle du fond. *Comme cette pression s'exerce également dans tous les sens sur les parois extérieures du vase, nous la négligerons.* Il reste donc

$$P = Shd. \qquad \text{C. Q. F. D.}$$

106. Vérification expérimentale. — La pression sur le fond d'un vase dépend donc de la grandeur de ce fond, ainsi que de la profondeur et de la densité du liquide, mais elle est indépendante *de la quantité de liquide et de la forme du vase.* C'est cette conséquence qu'on vérifie expérimentalement à l'aide de plusieurs appareils.

1° *Appareil de Haldat.* — Ce vieil appareil classique se compose d'un tube

Fig. 96.

coudé ABC, terminé en A par un robinet *de cuivre sur lequel on peut visser successivement deux vases M et P, de même hauteur, mais de forme et de capacité*

différentes (fig. 96). Pour faire l'expérience, on commence par verser du mercure dans le tube ABC, de manière que le niveau n'atteigne pas tout à fait le robinet A. On visse alors sur le tube le vase M, qu'on remplit d'eau; celle-ci, par son poids, refoule le mercure, qui s'élève dans le tube C, où l'on en repère le niveau au moyen d'une virole *a*, qui peut glisser le long du tube. On marque de même le niveau de l'eau dans le vase M à l'aide d'une tige mobile *o* placée au-dessus. Cela fait, on vide le vase M au moyen du robinet, on le dévisse et on le remplace par le vase P. Si l'on verse de l'eau dans celui-ci, le mercure, qui avait repris son premier niveau dans les deux branches du tube ABC, s'élève de nouveau dans le tube C, et lorsque, dans le vase P, l'eau atteint de nouveau l'extrémité de la tige *o*, le mercure remonte aussi dans le tube C jusqu'au repère *a*. On conclut de là que la pression transmise au fond mobile constitué par la surface libre du mercure dans le tube A est la même dans les deux cas. Cette pression est donc indépendante de la forme du vase et de la quantité de liquide.

2° *Appareil de Masson.* — Dans l'appareil de Masson (fig. 97), la pression de l'eau contenue dans le vase M ne s'exerce plus,

Fig. 97.

comme précédemment, sur une colonne de mercure, mais sur un disque ou obturateur *a*, qui ferme une tubulure *c*, sur laquelle est vissé le vase M. Ce disque n'est pas fixé à la tubulure, mais seulement soutenu par un fil attaché à l'extrémité du fléau d'une balance. A l'autre extrémité est un bassin dans lequel on met des poids jusqu'à ce qu'ils fassent équilibre à la pression exercée par *l'eau sur l'obturateur.* Vidant alors le vase M, on le dévisse et l'on

met à sa place le tube étroit P. Or, si l'on remplit celui-ci d'eau jusqu'à la même hauteur que précédemment, ce qu'on reconnaît au moyen du repère *o*, on observe que, pour soutenir l'obturateur, il faut mettre dans le plateau juste le même poids qu'auparavant. Cela conduit à la même conclusion que l'expérience de Haldat. Même résultat si, au lieu du tube vertical P, on visse sur la tubulure *c* le tube oblique Q.

107. **Conséquences.** — 1° *Tonneau de Pascal.* — Il résulte des deux expériences précédentes qu'avec une très petite quantité de liquide on peut produire des pressions considérables. Pour cela, il suffit de fixer à la paroi d'un vase fermé et plein d'eau un tube d'un petit diamètre et d'une grande hauteur. Ce tube étant rempli d'eau, la pression transmise sur la paroi du vase est égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base cette paroi et une hauteur égale à celle du tube. Pascal est parvenu ainsi, avec un simple filet d'eau de 10 mètres de hauteur, à faire éclater un tonneau solidement construit. Cette expérience s'appelle quelquefois expérience du *tonneau de Pascal.*

2° *Pression au fond des mers.* — D'après le principe ci-dessus, on peut calculer les pressions qui se produisent au fond des mers. L'unité de mesure usitée est la pression de l'atmosphère, laquelle équivaut, pour une surface donnée, au poids d'un cylindre d'eau pure ayant pour base cette surface et environ 10m,33 de hauteur. Or les naturalistes qui ont récemment exploré le fond des mers, à bord du *Talisman*, puis du *Travailleur*, ont observé que la sonde ne touchait pas quelquefois à une profondeur de 8000 mètres et plus. C'est donc une pression de plus de 800 fois celle de l'atmosphère qui s'exerce au fond de certaines mers.

108. Pressions sur une paroi plane latérale. — Théorème. — ***Dans un liquide pesant en équilibre, les pressions exercées sur une portion plane de paroi latérale ont une résultante qui est normale à la paroi et égale au poids d'un cylindre du liquide ayant pour base la portion de paroi et pour hauteur la distance de son centre de gravité à la surface libre. Elle est appliquée en un point qu'on appelle centre de pression.***

Démonstration. — Menons un plan vertical perpendiculaire à la paroi, et prenons-le pour plan de la figure. Soient MN, AB les sections de la surface libre et de la portion plane de paroi (fig. 98). Sur chacun des éléments de surface, tels que ω, s'exerce une pression élémentaire p qui lui est normale. Toutes ces forces, étant parallèles, ont une résultante unique, qui leur est parallèle, égale à la somme, et appliquée au centre de ce système de forces parallèles. On a donc

$$P = \sum (p).$$

Or, en un point de l'élément, la pression ϖ est donnée par l'équation fondamentale $\varpi = \varpi' + hd$, ϖ' étant la pression exercée en un point quelconque de la surface libre. En négligeant cette dernière pression, on a

$$\varpi = hd \qquad \text{et} \qquad p = \omega hd;$$

donc

$$P = \sum (\omega hd). \qquad P = d \sum (\omega h).$$

On peut déduire du *théorème général des moments*[1] un moyen très simple de calculer la somme des produits tels que ωh. En effet, remarquons d'abord que, si l'on multiplie chacun de ces termes par δ, poids spécifique de l'unité de surface de la paroi, toute la somme sera elle-même multipliée par δ, et l'on aura

$$\sum(\omega h\delta) = \delta\sum(\omega h).$$

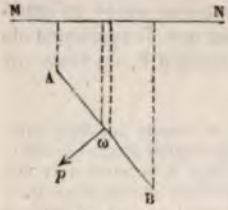


Fig. 98.

Or $\omega\delta$ est le *poids* de l'élément de paroi ω, et h étant la distance de son point d'application (lequel est un point quelconque de l'élément) au plan de la surface libre, le produit $\omega h\delta$ est le *moment de la force* ωd par rapport *au plan* MN. La somme $\sum(\omega h\delta)$ est donc la somme des moments des poids des divers éléments de la portion de paroi. D'après le théorème des moments, cette somme est égale au moment de la résultante, c'est-à-dire au moment du poids total de la portion de paroi. Soit S la surface totale de cette portion, son poids est $S\delta$; soit H la distance du centre de gravité à la surface libre, le moment du poids total est $SH\delta$. On a donc

$$\sum(\omega h\delta) = SH\delta, \quad \text{d'où} \quad \delta\sum(\omega h) = SH\delta \quad \text{et} \quad \sum(\omega h) = SH.$$

En substituant cette valeur, on a $P = SH\delta$. C. Q. F. D.

109. Centre de pression. — C'est *le point d'application de la pression totale sur la portion de paroi considérée.* Il est nécessairement distinct du *centre de gravité* de cette paroi, lequel est le point d'application du poids total de sa surface, supposée pesante.

En effet, les poids des éléments de la paroi sont simplement proportionnels à ces éléments, tandis que les pressions sur ces mêmes éléments sont proportionnelles aux produits de chaque élément par sa distance à la surface libre. Or, à mesure qu'on s'enfonce dans le liquide, le poids de l'élément de paroi reste constant, tandis que la pression élémentaire augmente proportionnellement à h. Il en résulte que le centre de pression doit se trouver *au-dessous* du centre de gravité.

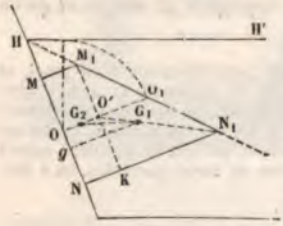


Fig. 99.

La détermination du centre de pression est un problème de mécanique, analogue à la détermination du centre de gravité d'une surface.

Exemple. — *Cas d'un rectangle immergé.* — Soit H'HN la section du vase et du liquide par le plan vertical de symétrie du rectangle (fig. 99). D'après ce qui précède, le volume liquide, dont le poids représente la pression, est un tronc de prisme qui a pour section méridienne le trapèze MM_1N_1N. On peut le partager en deux volumes, au moyen d'un plan M_1K, parallèle à la paroi. L'un de ces volumes est un parallélépipède rectangle qui a pour section M_1MNK et son centre de gravité en G_2, milieu de OO'. L'autre partie est un prisme triangulaire qui a son centre de gravité en G_1, au tiers de la médiane N_1O'. Le poids du volume

1. *Voir Mécanique* Maneuvrier et Berget.

total étant la résultante des poids de ces deux volumes partiels, le centre de gravité du volume total est situé sur la ligne G_2G_1, entre les deux points G_1 et G_2, et la projection de ce point sur la paroi sera le *centre de pression*.

On voit que ce point sera nécessairement au-dessous du point O, centre de gravité du rectangle et, en outre, aisément que, *lorsque la portion de paroi s'enfonce dans le liquide, son centre de pression remonte vers son centre de gravité, tout en restant au-dessous de ce point.*

110. Pressions sur l'ensemble des parois d'un vase. — THÉORÈME. — *Dans un liquide pesant en équilibre, toutes les pressions exercées sur l'ensemble des parois du vase qui le contient, quelle que soit sa forme, ont une résultante unique, dirigée de haut en bas, et égale au poids total du liquide.*

Ce théorème, comme les précédents, est un corollaire du théorème fondamental. On peut le démontrer de deux manières, synthétiquement et analytiquement.

Démonstration synthétique. — Soit un liquide pesant en équilibre dans un vase qui le contient. Le liquide et l'ensemble des parois du vase constituent un système matériel en équilibre sous l'influence de deux systèmes de forces opposées : d'une part, les poids des molécules liquides, qui ont une résultante unique égale au poids total du liquide; d'autre part, les résistances ou réactions, f, f', f'', que les éléments de paroi opposent aux éléments liquides juxtaposés. Ce dernier système, faisant équilibre au premier, a nécessairement une résultante unique, égale et opposée au poids total du liquide. Or ces réactions élémentaires des parois sont égales et opposées, chacune à chacune, aux pressions élémentaires p, p', p'' du liquide sur la paroi : donc ce dernier système a aussi une résultante unique précisément égale au poids total des liquides et dirigée dans le même sens.

Démonstration analytique. — Elle consiste à considérer les pressions élémentaires p', p'... du liquide sur les parois comme un système de forces quelconques appliquées à un corps solide, et à en chercher la résultante par la méthode générale.

Soit un vase de forme quelconque (fig. 100), HH' la surface libre du liquide, Ox, Oy, Oz trois axes de coor-

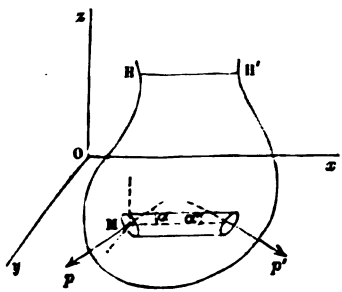


Fig. 100.

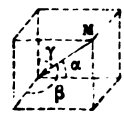


Fig. 101.

données rectangulaires quelconques. Soit un élément ω pris autour d'un point M de la paroi. Soient p la pression au point M et α, β, γ les angles qu'elle fait avec les trois axes. En appliquant la règle du parallélépipède des forces, on décompose p en trois composantes, qui ont pour intensités respectives $p \cos \alpha$,

$p \cos \beta$ et $p \cos \gamma$ (fig. 101). En effectuant la décomposition sur chacune des forces p, on a trois systèmes de forces respectivement parallèles à chacun des axes coordonnés. Chacun d'eux a une résultante égale à la somme. Ces trois résultantes partielles sont :

$$X = \sum (p \cos \alpha), \qquad Y = \sum (p \cos \beta), \qquad Z = \sum (p \cos \gamma).$$

Analysons les termes qui constituent chacune de ces sommes.

Concevons un filet cylindrique parallèle à Ox et circonscrit à l'élément ω (fig. 101) : il découpera dans la partie opposée de la paroi un élément ω'. Soient p' la pression sur ce dernier élément et α', β', γ les angles que fait sa direction avec les axes. A chaque élément ω de la paroi correspond de même un élément ω', *et rien qu'un*. Les composantes de la pression p' sont $p' \cos \alpha'$, $p' \cos \beta'$, $p' \cos \gamma$. On peut donc grouper tous les termes de la somme $\sum (p \cos \alpha)$ par couples de deux, correspondant à un même filet parallèle à Ox, et écrire

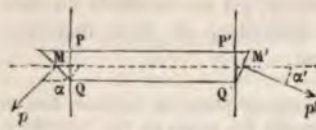


Fig. 102.

$$X = \sum (p \cos \alpha + p' \cos \alpha').$$

Or on a évidemment

$$p = \pi\omega \quad \text{et} \quad p' = \pi\omega'.$$

Si nous menons deux plans perpendiculaires à l'axe en PQ et en P' Q', nous avons deux sections droites du cylindre qui sont égales (fig. 102). Soit σ la grandeur de la section droite. PQ étant la projection de ω, on a

$$\text{PQ ou } \sigma = \omega \cos (180^0 - \alpha) = -\omega \cos \alpha.$$

On a de même

$$\text{P'Q' ou } \sigma' = \omega' \cos \alpha'.$$

On a donc

$$\sigma = \omega' \cos \alpha' = -\omega \cos \alpha.$$

Substituons ces valeurs dans la somme X, il vient, toutes réductions faites,

$$X = \sum (\pi\sigma - \pi\sigma) = 0.$$

On démontrera de la même manière que Y est identiquement nul.

On peut appliquer le même mode de raisonnement à l'évaluation de la somme Z. On arrivera à une somme de binômes tels que $p \cos \gamma + p' \cos \gamma'$.

Mais ici, les points M et M' n'étant plus sur le même plan horizontal, on aura

$$\pi' = \pi + zd,$$

par conséquent

$$p' = \pi'\omega' = \pi\omega' + \omega' zd$$

et

$$Z = \sum \pi' (\omega \cos \gamma - \omega' \cos \gamma') + \sum \omega zd \cos \gamma.$$

Le premier terme est identiquement nul, comme les termes analogues des autres sommes. Le deuxième représente la somme des poids des filets cylindriques verticaux, dans lesquels on peut déposer le volume total du liquide : *cette somme est évidemment égale au poids total du liquide.*

C. Q. F. D.

111. **Paradoxe hydrostatique.** — Ce dernier théorème réfute directement la proposition erronée connue sous le nom de *paradoxe hydrostatique.*

Si l'on a trois vases, A, B, C (fig. 103), de même fond, mais de forme et de capacité différentes, remplis d'eau jusqu'à la même hauteur, l'opinion commune — conforme d'ailleurs à la vérité — c'est qu'il faudra des poids différents pour les équilibrer successivement sur un même plateau de balance. Mais on sait que la

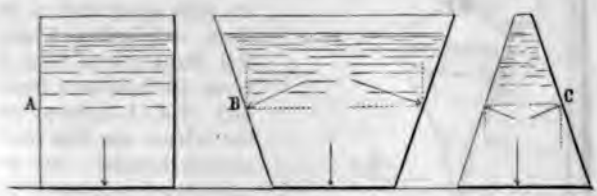


Fig. 103.

pression est la même sur le fond de chacun de ces vases : il semble donc en résulter nécessairement qu'en plaçant dans l'un des plateaux un poids marqué égal à cette pression, on équilibrera successivement les trois vases placés dans l'autre plateau. C'est cette conséquence fausse d'un principe vrai qui constitue le paradoxe.

L'erreur consiste à raisonner, dans ce cas, comme si le fond de chaque vase était détaché et indépendant des parois latérales; or ces parois, étant solidaires, transmettent au plateau, non pas seulement la résultante partielle des pressions exercées sur le fond, mais la résultante totale des pressions exercées sur l'ensemble, et nous avons vu que *cette résultante est égale, dans tous les cas, au poids total du liquide.*

Dans le cas du vase cylindrique A, la pression sur le fond est précisément égale au poids total du liquide; dans le vase évasé B, la pression sur le fond est inférieure au poids total, mais les pressions latérales tendent à l'accroître; enfin, dans le vase conique C, la pression sur le fond est supérieure au poids total, mais les pressions latérales tendent à la diminuer.

112. **Vases à réaction.** — *Tourniquet hydraulique.* — Lorsqu'on ouvre un orifice dans la paroi d'un vase qui contient un liquide pesant en équilibre, en même temps que ce liquide s'échappe du vase, celui-ci tend à se mouvoir *en sens contraire de l'écoulement.* Si le vase est disposé de manière à obéir aisément à cette impul-

sion, on a ce qu'on appelle un *vase à réaction*. Le type de ces appareils est le *tourniquet hydraulique*.

Il se compose d'un vase de verre M (fig. 104), reposant sur un pivot, de manière à pouvoir tourner librement autour d'un axe vertical. Ce vase porte à sa partie inférieure, perpendiculairement à son axe, un tube de cuivre C, coudé horizontalement et en sens contraires à ses deux extrémités. L'appareil étant rempli d'eau, il reste parfaitement immobile aussi longtemps que les orifices du tube coudé restent bouchés. Mais dès que ceux-ci sont ouverts, le liquide s'échappe dans le sens des courbures et tout l'appareil prend un mouvement de rotation en sens contraire de l'écoulement. Ce mouvement est d'autant plus rapide que la hauteur du liquide dans le vase M est plus grande et que la section des orifices de sortie présente plus de surface.

Fig. 104.

Pendule hydraulique. — On peut encore citer comme expérience de cours le *pendule hydraulique*. C'est un petit appareil formé d'une sphère à tubulure latérale remplie d'eau et fixée, comme un pendule, à l'extrémité d'un fil. Dès qu'on débouche l'orifice, le liquide s'échappe, et le pendule, s'écartant de la verticale en sens contraire de l'écoulement, se met à osciller.

On emploie aussi un *chariot* très mobile.

Roues à réaction. — Les pressions latérales sont utilisées dans les moteurs hydrauliques connus sous le nom de *roues à réaction*.

Théorie des vases à réaction. — Il faut se rendre compte à la fois du mouvement du liquide et de celui du vase. Dans les deux cas il suffit d'appliquer le principe de mécanique suivant :

Lorsqu'un système de forces se fait équilibre sur un corps solide, l'une quelconque des forces est égale et opposée à la résultante de toutes les autres.

Soit un liquide en équilibre dans un vase quelconque (fig. 105). On peut sup-

primer le vase par la pensée, à la condition de solidifier le liquide et d'appliquer à ses divers éléments les forces de résistance ou réactions f, f', f''... que les éléments de paroi leur opposent. On a ainsi un système de forces, composé du poids total P du liquide et des réactions f, f'..., qui se font équilibre. L'une quelconque d'entre elles, f par exemple, étant égale et opposée à la résultante des autres, si l'on vient à la supprimer, — ce qu'on fait en ouvrant un orifice dans la paroi en ce point, — la résultante de toutes les autres cessera d'être contre-balancée et précipitera le liquide par cet orifice

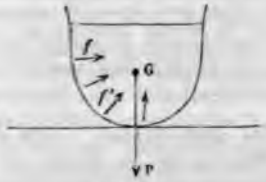


Fig. 105.

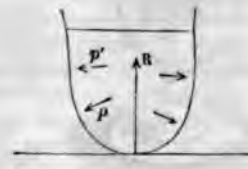


Fig. 106.

Quant au vase plein de liquide, on peut le considérer comme un corps solide soumis au système de forces suivant : 1° les pressions p, p'... du liquide sur les parois, pressions qui ont une résultante unique égale au poids total du liquide; 2° le poids des parois elles-mêmes; 3° la réaction R du plan qui supporte le vase ou du fil qui le soutient, et qui fait équilibre aux deux autres (fig. 106). Si l'on ouvre un orifice en face de l'une des pressions p, le liquide s'écoule, la pression p cesse donc de s'exercer et la résultante de toutes les autres forces, qui est égale et opposée à p, tend à entraîner le vase en sens contraire de l'écoulement.

PRESSIONS SUR LES CORPS IMMERGÉS.

115. **Principe d'Archimède.** — 1° Énoncé. — *Lorsqu'un corps solide est entièrement plongé dans un liquide pesant en équilibre, les pressions qui s'exercent à sa surface ont une résultante unique, égale et directement opposée au poids du volume liquide déplacé et appliquée au centre de gravité de ce volume.*

Cette résultante s'appelle la *poussée* du liquide; son point d'application s'appelle le *centre de poussée*.

Ce principe fut découvert par Archimède, de Syracuse. On l'énonce encore de la manière suivante :

Tout corps plongé dans un liquide pesant en équilibre y subit une poussée verticale de bas en haut, égale au poids du volume liquide déplacé.

2° Démonstration. — On peut en donner deux sortes de démonstrations, l'une théorique, l'autre expérimentale.

Démonstration à priori. — Dans une masse liquide en équilibre, considérons une portion de liquide de forme quelconque, *sphérique*, ovoïde ou irrégulière

et supposons-la solidifiée, sans accroissement ni diminution de volume (

Fig. 107.

Il est évident que la partie ainsi solidi
portera, de la part de la masse liq
mêmes pressions qu'auparavant, et q
conséquent, elle sera encore en équili
qui ne peut avoir lieu que parce qu'
porte, de bas en haut, une poussée éga
poids. Or, si à la place de la partie soli
imagine un corps d'une autre substa
même volume et de même forme, il su
nécessairement les mêmes pressions
portait le liquide solidifié, et dès lors
soumis, lui aussi, à une poussée égale
du liquide déplacé.

Vérification expérimentale. — E
fectue ordinairement au moyen
balance hydrostatique. C'est une

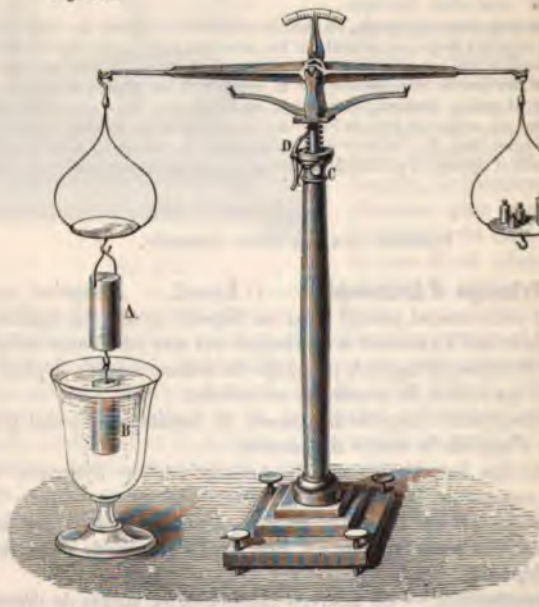


Fig. 108.

commune dont chaque plateau est muni d'un crochet, et
fléau peut s'élever et s'abaisser à volonté, à l'aide d'une

lère qu'on fait marcher par un petit pignon C (fig. 108). Un encliquetage D retient la crémaillère lorsqu'on l'a soulevée. Le fléau étant remonté, on suspend, au-dessous de l'un des plateaux un cylindre creux A, en laiton, et au-dessous de celui-ci un cylindre plein B, dont le volume est exactement le même que la capacité du premier; puis dans l'autre plateau on place des poids jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse. Si alors on remplit d'eau le cylindre A, l'équilibre est rompu; mais si l'on abaisse en même temps le fléau de manière que le cylindre B plonge en entier dans l'eau d'un vase placé au-dessous, on voit l'équilibre se rétablir. Le cylindre B subit donc, par son immersion, une poussée égale au poids de l'eau versée dans le cylindre A.

On voit que, dans cette expérience, tout se passe, au point de vue de l'équilibre du fléau, comme si le cylindre plein *perdait brusquement une partie de son poids* au moment de son immersion. C'est ce qui fait donner quelquefois à l'énoncé du principe la forme suivante, qui est incorrecte : *Tout corps plongé dans un liquide perd de son poids une partie égale au poids du liquide qu'il déplace.*

Remarque. — Au lieu d'une balance hydrostatique on emploie souvent une balance ordinaire, à plateaux munis de crochet. L'immersion du cylindre plein s'obtient alors par la manœuvre d'un support à crémaillère (fig. 125).

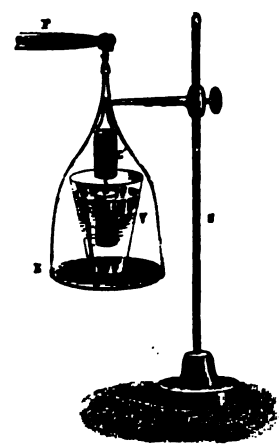


Fig. 109.

111. **Réciproque du principe d'Archimède.** — 1° Énoncé. — *Tout corps plongé dans un liquide pesant en équilibre exerce sur ce liquide une pression verticale, de haut en bas, égale au poids du volume liquide déplacé.*

On peut en donner un autre énoncé, moins correct, mais plus frappant : *Le poids perdu par le corps immergé est gagné par le liquide ambiant.*

2° Démonstration. — *Vérification expérimentale.* — On n'a qu'à modifier légèrement l'expérience précédente. On place le vase plein d'eau sur le plateau même de la balance, et l'on tare dans l'autre plateau. Le système des deux cylindres, disposés comme précédemment, le plein au-dessous du creux, est suspendu à un support fixe (fig. 109). *On relève le fléau de la balance de manière à faire plonger le cylindre plein dans le liquide. Aussitôt que l'immersion commence, l'équilibre est détruit. Lorsque l'immersion est complète, on*

verse dans le cylindre creux de l'eau prise dans le vase; on constate que, dès que le cylindre est rempli, l'équilibre est complètement rétabli.

Démonstration à priori. — L'explication théorique de ce fait est très simple. Ou bien on peut le considérer comme une conséquence du principe général de l'égalité de l'action et de la réaction : si le corps plongé subit une poussée de la part du liquide ambiant, celui-ci doit subir de la part du corps une réaction égale et contraire. Ou bien l'on peut remarquer simplement que, lorsqu'on plonge un corps dans un liquide, on élève le niveau dans le vase; la résultante des pressions sur les parois s'accroît donc de la même quantité que si l'on avait ajouté au liquide un volume égal au volume déplacé : cet accroissement de la pression résultante est évidemment égal au poids du volume déplacé.

115. Vérification simple du principe d'Archimède : dispositif de M. Boudréaux. — Un grand vase V (fig. 110), muni d'un trop-plein, et deux petits vases v, v' identiques, une simple balance à crochets et un support à crémaillère MN, suffisent à M. Boudréaux pour vérifier ces propositions avec plus d'exactitude.

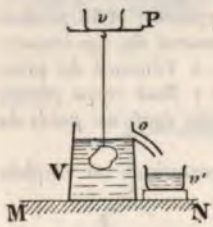


Fig. 110.

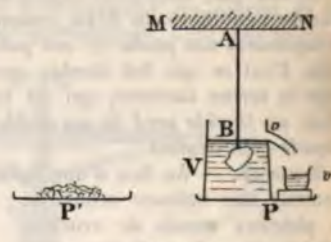


Fig. 111.

Le corps, suspendu au plateau P, est équilibré, un des vases v étant dans le même plateau. On immerge le corps, qui expulse un volume d'eau égal au sien, qu'on recueille dans le vase v' : le plateau P remonte par l'effet de la poussée. En substituant le vase v' au vase v, on rétablit l'équilibre : ce qui démontre évidemment le principe.

Pour démontrer la réciproque, on tare le vase v plein de liquide et le vase v' à sec, puis on immerge le corps (fig. 111). Le plateau P s'abaisse, en même temps que le vase v' reçoit un volume du liquide égal à celui du corps. Pour rétablir l'équilibre, il suffit de vider le vase v' et de le remettre en place : la vérification est évidente.

116. Détermination du volume d'un corps. — Le principe d'Archimède donne le moyen d'obtenir avec précision le volume d'un corps de la forme la plus irrégulière, lorsqu'il n'est pas soluble dans l'eau et ne l'absorbe pas. Pour cela, l'ayant suspendu par un fil à la balance hydrostatique, on le pèse dans l'air, puis dans l'eau pure. La perte de poids représente le poids et aussi le volume de l'eau déplacée et, par suite, le volume du corps immergé. Si, par exemple, la perte de poids est de 155 grammes-*poids, le volume du* corps plongé est de 155 centimètres cubes.

Remarque. — *L'eau* n'étant généralement pas à 4°, il y aura à

faire une petite correction, car le volume de l'eau à t^0 n'est plus exprimé par le même nombre que son poids[1].

117. **Équilibre des corps immergés et des corps flottants.** — D'après le principe d'Archimède, tout corps plongé dans un liquide est soumis à deux forces verticales et de sens contraires : son poids P appliqué en son centre de gravité g et la poussée P′ appliquée au centre de poussée c (fig. 112). Si le solide et le liquide sont des corps homogènes, les centres de gravité du volume commun qu'ils occupent dans l'espace coïncident nécessairement. Les points g et c ne font qu'un et les forces P et P′ sont directement opposées. Si l'un des corps n'est pas homogène, ce qui est le cas général, leurs points d'application, g et c, sont distincts.

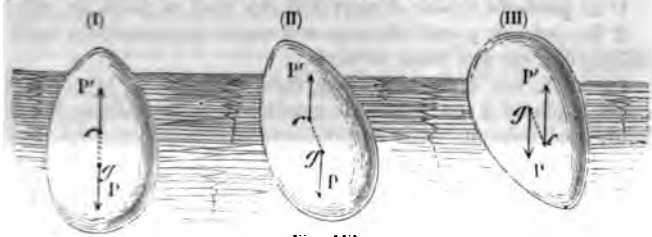


Fig. 112.

Les forces P et P′, étant parallèles et de sens contraires, ont toujours une résultante égale à leur différence (P — P′). Il y a trois cas à considérer :

1° $P - P' > 0$, d'où $P > P'$. *Le poids du solide l'emporte sur la poussée du liquide.* Le corps tombe au fond du liquide d'un mouvement uniformément accéléré[2], entraîné par la force constante (P — P′). On réalise aisément ce cas en mettant un œuf dans un vase contenant de l'eau pure.

2° $P - P' = 0$, d'où $P = P'$. *Le poids est égal à la poussée.* Le corps reste en équilibre dans le liquide, pourvu toutefois qu'il soit orienté de manière que les deux forces égales soient directement opposées. On réalise ce cas en mettant un œuf dans un mélange d'eau pure et d'eau saturée de sel marin.

3° $P - P' < 0$, d'où $P < P'$. *La poussée l'emporte sur le poids.* Le corps remonte vers la surface libre, d'un mouvement uniformément accéléré, entraîné par la force constante (P′ — P). A partir de l'instant où il émerge, la poussée décroît en même temps que le volume du liquide déplacé diminue. Le corps atteint néces-

1. Voir § 125.
2. Abstraction faite de la résistance du *liquide*.

sairement une position pour laquelle $P' = P$. Il devrait rester en équilibre dans cette position; mais il la dépasse en vertu de la vitesse acquise, il y revient ensuite en vertu de son poids et finit par s'y fixer après une série d'oscillations plus ou moins nombreuses. On dit que le corps *flotte*; c'est un *corps flottant en équilibre*. On réalise aisément ce cas en mettant un œuf dans de l'eau saturée de sel marin. La cire, le bois et tous les corps plus légers que l'eau flottent à sa surface. De même une masse de fer qui tomberait immédiatement au fond de l'eau, surnage dans un bain de mercure.

118. Conditions d'équilibre des corps flottants. — Métacentre. — Pour qu'un corps flottant demeure en équilibre, il doit réaliser deux conditions :

1° *Le poids du liquide déplacé doit être égal au poids du corps;*

2° *Le centre de gravité du corps et le centre de poussée du liquide doivent être sur une même verticale.*

En effet, ces deux conditions étant satisfaites, le poids du corps appliqué à son centre de gravité, et la poussée de bas en haut, appliquée au centre de pression, sont deux forces non seulement égales, mais directement opposées : donc elles se font équilibre (fig. 112, I). D'ailleurs ces deux conditions sont nécessaires. En effet, si la première n'est pas satisfaite, nous avons vu plus haut que le corps tombe ou remonte à la surface (fig. 112, II et III). Si la deuxième n'était pas satisfaite, la première l'étant, les forces égales P et P' formeraient un couple qui ferait tourner le corps jusqu'à ce que les points *g* et *c* fussent ramenés sur une même verticale, et le corps ne demeurerait en équilibre qu'après une série d'oscillations.

Vérification expérimentale. — On vérifie aisément la première condition à l'aide du vase à trop-plein de M. Boudréaux. On immerge un corps flottant A (fig. 113) qui déplace un certain volume de liquide qu'on recueille dans le vase *v*. On constate que le poids de ce liquide est précisément égal à celui du corps flottant.

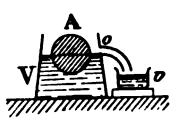


Fig. 113.

Plan de flottaison. — Quand le corps flottant est en équilibre, la surface libre du liquide y détermine une section plane horizontale, qu'on appelle *plan de flottaison*. Ce plan est défini par les deux conditions d'équilibre précédentes : le poids du liquide déplacé doit être égal au poids du corps solide; le centre de gravité du corps et le centre de poussée doivent être sur une même perpendiculaire au plan de flottaison.

Condition de stabilité. — Cet équilibre peut d'ailleurs être stable

ou instable, suivant que le corps, étant écarté légèrement de sa position d'équilibre, tend ou ne tend pas à y revenir. La stabilité dépend de la position du centre de poussée par rapport au centre de gravité, ou plutôt de la place qu'occupe, sur la verticale passant par le centre de gravité, dans la position d'équilibre considérée, un point particulier appelé *métacentre*.

Fig. 114.

Positions du métacentre. — Soit ABC (fig. 114) la section d'un navire par un plan passant par la verticale xy, sur laquelle sont situés le centre de gravité g du navire et le centre de poussée c du liquide déplacé dans la position d'équilibre normale. Lorsque le navire s'incline dans la position A' B' C', la ligne xy s'incline en x' y', et le centre de gravité, qui ne change pas par rapport au navire, passe de g en g', tandis que, la forme du liquide déplacé n'étant plus la même, le centre de poussée change par rapport au navire, et prend, par exemple, la position c'. Menons par le point c' une verticale qui coupe la droite x' y' en m; on peut supposer la poussée du liquide appliquée au point m. Si le point m est situé au-dessus du point g', il est évident que les forces appliquées en m et en g' auront pour effet de ramener le navire à sa première position ABC, et que par suite *l'équilibre sera stable*. Si, au contraire, le point m est au-dessous du centre de gravité en m', les deux forces appliquées en m' et en g' auront pour effet de faire chavirer le navire, et *l'équilibre sera instable*. On donne le nom de *métacentre* au point m où la verticale c' m' coupe la droite x' y'. On peut donc résumer ce qui précède en disant que *les corps flottants sont en équilibre stable quand le métacentre est plus haut que le centre de gravité du corps flottant, et en équilibre instable lorsque le métacentre est plus bas.*

La détermination du métacentre et du centre de gravité est d'une grande importance dans l'arrimage des navires, car c'est de leur position relative que dépend la stabilité.

Fig. 115.

119. Ludion. — Les effets divers de suspension, d'immersion et de flottaison dans un liquide sont reproduits avec le petit appareil qu'on nomme *ludion*. Il se compose d'une éprouvette de verre remplie d'eau en partie, et surmontée d'un tube de cuivre dans

lequel est un piston qu'on fait marcher à la main, et qui le ferme hermétiquement (fig. 115). Dans le liquide est une figurine d'émail, soutenue par une boule de verre creuse *a*, qui contient de l'air et de l'eau et flotte à la surface. Cette boule est percée, à sa partie inférieure, d'une petite ouverture par laquelle l'eau peut pénétrer ou sortir, selon que l'air intérieur de la boule est plus ou moins comprimé. Cette eau forme donc un lest de grandeur variable, qui permet de modifier à volonté le poids du corps immergé de manière à réaliser les trois cas $P < P'$, $P = P'$ et $P > P'$.

La quantité d'eau préalablement introduite dans la boule est telle, que la poussée P' soit légèrement supérieure à P : le corps flotte donc au début, en émergeant un peu; mais il suffit de donner à P un faible accroissement pour qu'il y ait immersion. Pour cela on exerce une légère pression avec le piston (fig. 115): l'eau pénètre alors dans la boule, jusqu'à ce que la force élastique de l'air, qu'elle y comprime, fasse équilibre à la pression extérieure qui l'y pousse : le poids du ludion augmente et celui-ci s'enfonce. Si l'on cesse alors de presser, l'air de la boule se détend, chasse l'excès d'eau qui y a pénétré, et le corps immergé flotte de nouveau.

120. Natation. — Le corps humain est généralement plus léger, à volume égal, que l'eau douce : aussi peut-il flotter naturellement sur ce liquide, et mieux encore sur l'eau salée de la mer, qui est plus dense. La difficulté de la natation est donc moins de se maintenir à la surface de l'eau que de pouvoir tenir la tête hors du liquide, afin de respirer librement. Or, chez l'homme, la tête, ayant un grand poids par rapport aux membres inférieurs, tend à plonger; c'est ce qui fait que la natation est pour l'homme un exercice physique qu'il doit apprendre. Chez les quadrupèdes, au contraire, la tête pesant moins que la partie postérieure du corps, peut sans effort demeurer hors de l'eau; aussi ces animaux nagent-ils naturellement.

CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES LIQUIDES PESANTS.

121. Équilibre d'un liquide dans un seul vase. — Il y a deux *conditions d'équilibre* qui sont les corollaires immédiats du théorème fondamental :

1° *La pression doit être la même en tous les points d'un même plan horizontal;*

2° *La surface libre du liquide doit être plane et horizontale.*

Remarques. — 1° *Définition des surfaces de niveau.* — On donne un nom particulier au lieu géométrique des points qui, dans un liquide en équilibre sous l'influence de forces quelconques, supportent la même pression : on l'appelle *surface de niveau*. La surface libre d'un liquide est toujours une surface de niveau. On

voit en outre que, dans un liquide pesant en équilibre, les surfaces de niveau sont des plans horizontaux.

2° *Propriété générale des surfaces de niveau.* — Dans le cas actuel, les surfaces de niveau sont perpendiculaires à la verticale, c'est-à-dire *à la direction de la force qui produit l'équilibre* : c'est là une propriété générale des surfaces de niveau.

3° *Courbure de la surface des mers.* — Remarquons enfin que, dans un liquide pesant en équilibre, les surfaces de niveau en général, et la surface libre en particulier, ne peuvent être planes que sur une petite étendue, c'est-à-dire dans les limites où les verticales peuvent être considérées comme parallèles. Or il ne peut en être ainsi pour une surface liquide d'une grande étendue, comme celle des mers. En effet, puisque la direction de la pesanteur passe en chaque lieu par le centre de la terre, il en résulte que la surface des mers change aussi de direction de manière à rester toujours perpendiculaire à la pesanteur : elle prend une forme sensiblement sphérique.

122. Équilibre d'un seul liquide dans un système de vases communicants. — *Énoncé des conditions.* — Lorsque plusieurs vases de forme quelconque et contenant le même liquide communiquent entre eux, il n'y a équilibre qu'autant que :

1° et 2° *Dans chaque vase, le liquide satisfait aux deux conditions précédentes* (121);

3° *Les diverses surfaces libres du liquide, dans tous les vases, sont situées dans un même plan horizontal.*

Démonstration des deux premières conditions. — Les deux premières conditions sont des corollaires immédiats du théorème fondamental, lequel est indépendant de la forme du vase qui contient le liquide.

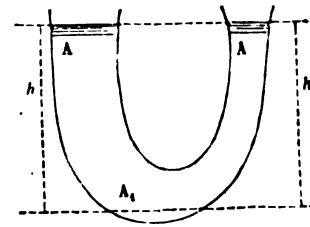


Fig. 116.

Démonstration de la troisième condition. — En effet, imaginons le plan de niveau auquel appartient un point A_1 (fig. 116). Soit h la distance verticale d'un point quelconque de l'une des surfaces libres au-dessus de ce plan, et h' la distance d'un point quelconque de l'autre surface. On peut évaluer la pression en A_1 de deux manières et écrire

$$p = hd = h'd, \qquad \text{d'où} \qquad h = h'.$$

On démontrerait de même que $h = h' = h''$, etc., quel que soit le nombre des surfaces libres et, par suite, des vases communicants.

Vérification. — La troisième condition peut se vérifier expérimentalement : on prend un large vase (fig. 117) sur la paroi latérale duquel on a mastiqué un tube en cuivre horizontal, muni de tubulures métalliques verticales. Sur chacune de ces tubulures on peut mastiquer exactement des tubes en verre, de formes quelconques A, B, C, dont l'ensemble forme avec le vase principal un système plus ou moins complexe de vases communicants. Les vases étant remplis d'eau, et le liquide étant en équilibre, on vérifie au cathétomètre que les diverses surfaces libres sont sur un même plan horizontal.

Fig. 117.

123. Équilibre des liquides superposés. — *Énoncé des conditions.* — Lorsque plusieurs liquides, qui ne peuvent se mélanger ni réagir chimiquement, sont versés dans un même vase, il faut, pour qu'il y ait équilibre :

1° et 2° Que *chacun d'eux satisfasse aux conditions nécessaires dans le cas d'un seul liquide* (121);

3° Que *les liquides soient superposés par ordre de densités croissantes de haut en bas;*

4° Que *les surfaces de séparation des liquides (deux à deux) soient horizontales.*

Les conditions d'équilibre relatives à chacun des liquides superposés n'ont pas besoin d'être démontrées. Elles sont évidemment nécessaires dans tous les cas.

Démonstration de la troisième condition. — Elle se déduit du principe d'Archimède et de l'équilibre des corps immergés. Il est évident qu'une goutte d'un liquide lourd, tel que le mercure, étant placée dans un liquide moins dense, tel que l'eau, tombera nécessairement au fond. Inversement, une goutte d'un liquide léger, tel que l'huile, flottera à la surface d'un liquide plus dense, tel que l'eau.

Démonstration de la quatrième condition. — La quatrième condition est une conséquence du théorème fondamental.

Soit MN la section par un plan vertical d'une surface de séparation de forme quelconque. Soient deux plans horizontaux quelconques, A et A', distants de h, l'un dans le liquide inférieur et l'autre dans le liquide supérieur. Soient A, M, A' trois points pris sur la même verticale (fig. 118) dans le liquide inférieur, sur la surface de séparation, et dans le liquide supérieur. Soient p, ϖ et p' les pressions en ces trois points; d et d' les poids des deux liquides, sous l'unité de volume. On a d'abord

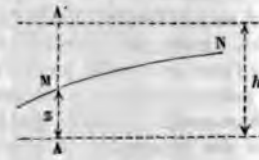


Fig. 118.

$$[1] \qquad p = \varpi + zd,$$

(z, distance du point M au plan inférieur). On a de même

$$[2] \qquad \varpi = p' + (h - z)d'.$$

En éliminant ϖ entre ces deux équations, il vient

$$p = p' + zd + (h - z)d' = p' + hd' + z(d - d').$$

De là on tire

$$z = \frac{p - p' - hd'}{d - d'}.$$

Tous les termes du second membre sont constants : donc z est constant. Tous les points de la surface de séparation sont donc à une même distance du plan A : donc cette surface est un plan horizontal.

Vérification de la troisième condition. — On la réalise au moyen

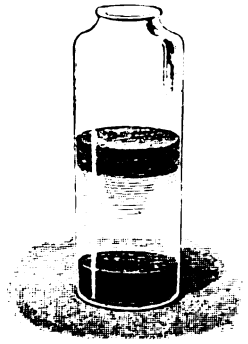


Fig. 119.

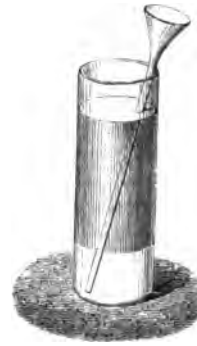


Fig. 120.

de la *fiole des quatre éléments* (fig. 119). On nomme ainsi un flacon long et étroit, contenant du mercure, de l'eau saturée de carbonate de potasse, de l'*alcool coloré en rouge*, et de l'huile de

naphte. Lorsqu'on agite le flacon, les liquides semblent se mélanger; mais aussitôt qu'on le maintient au repos, le mercure, qui est le plus dense, se précipite au fond; puis, en dessus, se déposent successivement l'eau, l'alcool et l'huile de naphte. Tel est, en effet, l'ordre des densités décroissantes de ces corps. C'est afin que l'eau ne se mêle pas à l'alcool qu'on la sature de carbonate de potasse, ce sel n'étant pas soluble dans l'alcool.

Remarques. — 1° *Cas des liquides miscibles entre eux. — Diffusion des liquides.* — Il importe d'observer que l'état d'équilibre des liquides superposés n'est rigoureusement stable qu'autant qu'ils ne peuvent se mélanger. Sinon, lorsqu'ils sont miscibles, ou, comme on dit, *diffusibles*, ils finissent par se mélanger spontanément et intimement. C'est en cela que consiste le phénomène de la *diffusion des liquides*, étudié par Graham.

Si, par exemple, on remplit aux trois quarts une haute éprouvette en verre (fig. 120) avec de la teinture de tournesol étendue, et qu'on fasse arriver lentement de l'acide sulfurique à la partie inférieure à l'aide d'un entonnoir à long col, la surface de séparation du liquide incolore et du liquide bleu est d'abord très nette; mais on voit bientôt le tournesol passer graduellement au rouge de haut en bas. Au bout de quarante-huit heures la liqueur est rougie dans toute la hauteur, ce qui prouve la diffusion réciproque des deux liquides.

2° *Quelques conséquences.* — C'est en vertu de la troisième condition que l'eau douce, à l'embouchure des fleuves, surnage assez longtemps au-dessus de l'eau salée de la mer, et que la crème, qui est moins dense que le lait, s'en sépare peu à peu pour monter à la surface.

124. Équilibre de deux liquides hétérogènes dans deux vases communicants. — *Énoncé des conditions.* — Lorsque deux liquides, inégalement denses, et sans action chimique l'un sur l'autre, sont contenus dans deux vases communicants, il faut, pour qu'ils soient en équilibre :

1°, 2°, 3° et 4° Qu'*ils satisfassent aux trois conditions d'équilibre d'un seul liquide dans des vases communicants* (122), *puis à celles de deux liquides superposés dans un seul vase* (123);

5° Que *les hauteurs des deux surfaces libres au-dessus de la surface commune de séparation soient en raison inverse des poids spécifiques*[1] *des deux liquides.*

Vérification expérimentale. — On prend deux tubes de verre,

1. *Nous verrons ci-dessous* que l'on appelle poids spécifique d'un corps le *poids de son unité de volume.*

m, *n*, réunis par un tube à petit diamètre et fixés sur une planchette verticale (fig. 121); on y verse une certaine quantité de mercure, puis dans l'une des branches AB on verse de l'eau. La colonne AB exerçant en C une pression sur le mercure, le niveau de celui-ci baisse dans la branche AB et s'élève dans l'autre d'une quantité CD; en sorte que, l'équilibre étant établi, si l'on conçoit en B un plan horizontal BC, la colonne d'eau AB fait équilibre à la colonne de mercure DC. Mesurant alors les hauteurs DC et AB au moyen de deux échelles fixées parallèlement aux deux tubes, ou mieux à l'aide d'un cathétomètre, on trouve que la première est 13 fois et demie plus petite que AB. Or le mercure pèse 13 fois et demie plus que l'eau à volume égal : donc les hauteurs sont bien en raison inverse des poids spécifiques.

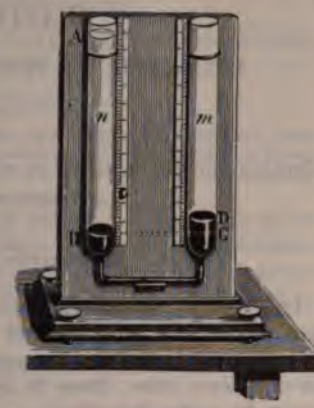


Fig. 121.

Démonstration théorique. — Il est facile de démontrer *à priori* cette condition d'équilibre. Il suffit d'appliquer deux fois le théorème fondamental à la surface de séparation B des deux liquides (fig. 122). Soient d et d' les poids spécifiques des liquides, h et h' les distances verticales des deux surfaces libres au plan BB' de séparation. La pression est la même en tous les points de ce plan. Dans la branche B elle a pour expression hd, abstraction faite de la pression atmosphérique ; de même, dans la branche B', la pression en un point est $h'd'$.

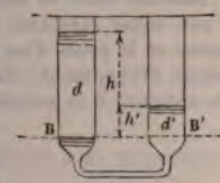


Fig. 122.

On a donc

$$p = hd = h'd', \qquad \text{d'où} \qquad \frac{h}{h'} = \frac{d'}{d}. \qquad \text{C. Q. F. D.}$$

CHAPITRE III

APPLICATIONS DES PRINCIPES D'HYDROSTATIQUE

DÉTERMINATION DES DENSITÉS ET POIDS SPÉCIFIQUES. — ARÉOMÈTRES. APPLICATIONS DIVERSES.

DÉTERMINATION DES DENSITÉS.

125. **Définitions générales.** — *Densité absolue.* — On appelle *densité absolue* d'une substance la masse de l'unité de volume de cette substance. Dans le système métrique, ce serait la masse du décimètre cube. (Dans le système d'unités C. G. S., c'est la masse du centimètre cube.)

Poids spécifique absolu. — On appelle *poids spécifique absolu* d'une substance le poids de 1 *centimètre cube* (système C. G. S.) de cette substance.

Relation entre la densité absolue et le poids spécifique absolu d'une même substance. — L'équation générale $P = Mg$, qui lie la masse et le poids d'un volume quelconque d'un substance, s'applique évidemment à la masse et au poids de l'unité de volume. En appelant d la première et p le second, on a

$$p = dg.$$

Il résulte de cette relation :

1° Que le poids spécifique absolu et la densité absolue d'une substance sont deux coefficients nettement distincts l'un de l'autre.

2° Que le poids spécifique d'une substance varie proportionnellement à g.

3° Que les poids spécifiques des différents corps sont proportionnels à leurs densités, *dans un même lieu.*

Exemples. — La densité absolue de l'eau pure (à 4°) n'est pas égale à l'unité C. G. S, parce que le kilogramme-étalon, déposé aux Archives, ne pèse pas exactement 1000 grammes métriques. Il en résulte que la millième partie de la *masse du kilogramme-étalon*, c'est-à-dire l'unité de masse C. G. S, n'est pas *identique à la masse de* 1 centimètre cube d'eau pure (à 4°), c'est-à-dire à la

densité absolue de l'eau pure (à 4°). Cette densité absolue est, d'après les recherches les plus récentes, représentée par le nombre 1,000013. On a

$$d = 1{,}000013 \text{ (en grammes-masse).}$$

Par suite, le *poids spécifique absolu* de l'eau pure (à 4°) est représenté à Paris par le nombre dg, ou $1{,}000013 \times 980{,}97$ ($= 980{,}97$). On a donc

$$p = 980{,}97 \text{ (en dynes).}$$

Tandis que la densité absolue de l'eau est partout égale à 1,000013, son poids spécifique absolu n'est égal à 980,97 que sous la latitude et à l'altitude de Paris; il est différent partout ailleurs.

Poids spécifique relatif et *densité relative*. — Supposons qu'on prenne le rapport du poids spécifique absolu p d'une substance au poids spécifique absolu p' d'une autre substance, choisie comme terme de comparaison. On avait entre le poids p et la densité absolue d de la première substance la relation

$$[1] \qquad p = dg;$$

on a de même entre le poids p_0 et la densité absolue d_0 de la substance-type la relation

$$[2] \qquad p_0 = d_0 g.$$

En prenant le rapport, il vient

$$[3] \qquad \frac{p}{p_0} = \frac{d}{d_0}.$$

Le rapport $\frac{p}{p_0}$ des poids spécifiques absolus est donc un nombre constant, indépendant de g, et il est égal au rapport $\frac{d}{d_0}$ des densités absolues. Le rapport $\frac{p}{p_0}$ s'appelle le *poids spécifique relatif* de la première substance (par rapport à la deuxième), et le rapport $\frac{d}{d_0}$ s'appelle la *densité relative* de la première substance (par rapport à la substance-type).

On voit que le *poids spécifique relatif* est égal à la *densité relative* : c'est pourquoi dans la pratique l'on emploie communément ces deux expressions l'une pour l'autre; cela n'a pas d'inconvénients, puisqu'elles désignent le même coefficient.

La substance-type *universellement adoptée* pour les corps

solides et liquides est l'eau pure (à la température de 4°); c'est l'air (à la température 0° et sous la pression 760^{mm}) pour tous les gaz.

Expression du poids spécifique absolu en fonction du poids spécifique relatif. — Soit δ la valeur commune des deux rapports $\frac{p}{p_0}$ et $\frac{d}{d_0}$. Le quotient δ est ce qu'on appelle ordinairement la *densité* du corps : c'est le nombre inscrit dans les *tables de densité*[1]. On a donc

$$\frac{p}{p_0} = \delta, \qquad \text{d'où l'on déduit} \qquad p = p_0\,\delta. \qquad [4]$$

L'équation [4] est une formule générale qui s'applique à tous les corps solides, liquides et gazeux. Elle exprime que le *poids spécifique absolu* d'un corps quelconque est égal au produit de sa densité (tabulaire) par le poids spécifique absolu de la substance-type. Pour les gaz, le coefficient p_0 est égal au poids du litre d'air normal (1^g,293 à Paris). Pour les corps solides et liquides, p_0 est égal au poids spécifique absolu de l'eau pure (à 4°); *dans la pratique*, on le considère comme égal à l'unité. Par conséquent, la formule générale [4] devient dans le cas des gaz

$$[4\ bis] \qquad p = 1^g,293 \times \delta$$

et dans le cas des liquides et des solides

$$[4\ ter] \qquad p = \delta.$$

Dans la formule [4 *bis*], p est exprimé en grammes et représente le poids d'un litre de gaz, δ étant la densité du gaz par rapport à l'air. Dans la formule [4 *ter*], p est aussi exprimé en grammes, mais représente le poids d'un centimètre cube du corps, δ étant la densité par rapport à l'eau pure (à 4°).

Remarques. — 1° En réalité le poids p_0 d'un centimètre cube d'eau pure (à 4°) n'est pas égal à 1 : on a vu, en effet, que le kilogramme des Archives n'est pas rigoureusement conforme à sa définition théorique, et qu'il est inférieur, de 0,000013 environ, au poids de 1 décimètre cube d'eau pure (à 4°). Il en résulte que la formule [4 *ter*] n'est pas rigoureusement exacte. Il faudrait l'écrire

$$p = 1{,}000013 \times \delta.$$

Mais comme la différence entre p_0 et l'unité porte seulement sur la cinquième

1. On l'appelle aussi quelquefois, à cause de cela, densité tabulaire.

décimale, — nombre qu'on atteint difficilement dans les mesures de densité, — on néglige cette différence et l'on considère la formule $p = \delta$ comme étant vraie dans la pratique.

Nous avons vu dans le système C. G. S. que p est le poids d'un centimètre cube de la substance, et p_0 le poids d'un centimètre cube d'eau pure (à 4°). Nous avons dit précédemment que p_0, exprimé en dynes, est égal à $980{,}96 \times 1{,}000013 = 980{,}97$ dynes, ou bien à 980,96 dynes si l'on néglige les 13 millionièmes de la densité de l'eau. On pourra donc exprimer en dynes le poids spécifique d'une substance solide ou liquide quelconque au moyen de la formule

$$[5] \qquad p = 980{,}95 \times \delta.$$

Poids d'un volume quelconque d'un corps solide ou liquide. — Soit P le poids inconnu d'un volume V d'une substance quelconque, solide ou liquide. On suppose connue la densité (tabulaire) de la substance.

Si p est le poids spécifique absolu, c'est-à-dire le poids de l'unité de volume, V unités de volume pèseront évidemment V fois plus : on aura donc

$$[6] \qquad P = Vp.$$

Dans le système métrique, V sera évalué en décimètres cubes, p sera donné par la formule [4 *ter*] et P sera exprimé en kilogrammes.

Dans le système C. G. S., V sera évalué en centimètres cubes, p sera donné par la formule [5] et P sera exprimé en dynes.

Nouvelle définition de la densité relative. — La formule [6] donne le poids d'un volume V d'une substance quelconque. Appliquons cette formule au cas de l'eau pure (à 4°) : cherchons le poids P_0 d'un volume V. On aura évidemment

$$[6\ bis] \qquad P_0 = Vp_0.$$

En divisant membre à membre les équations [6] et [6 *bis*], il vient $\frac{P}{P_0} = \frac{p}{p_0}$.

Or nous avons vu que le rapport $\frac{p}{p_0}$ est précisément égal à δ. On peut donc dire encore que le *poids spécifique relatif* ou *densité relative* (ou *densité tabulaire*) d'une substance quelconque est égal au *rapport des poids de volumes égaux* de la substance et d'eau pure (à 4°).

126. **Détermination des densités ou poids spécifiques.** — *Méthode.* — Une seule *méthode est employée* pour déterminer les

poids spécifiques des solides et des liquides. Elle consiste à mesurer : 1° le poids d'un certain volume du corps ; 2° le poids d'un égal volume d'eau ; puis à diviser le premier résultat par le deuxième. Cette méthode est appliquée de trois manières différentes, qui constituent trois procédés expérimentaux : le *procédé de la balance hydrostatique*, le *procédé des aréomètres* et le *procédé du flacon*.

Conditions expérimentales. — Il est nécessaire d'adopter des températures fixes pour les corps dont on recherche le poids spécifique et pour l'eau à laquelle on les compare. C'est pourquoi l'on est convenu de prendre les corps à la température de zéro, et l'eau à 4°, température de son maximum de densité. La condition de pureté n'est pas moins nécessaire pour l'eau, car son poids spécifique varie avec les substances qu'elle tient en dissolution.

Corrections usuelles. — Ces différentes conditions n'étant pas généralement satisfaites dans les circonstances où l'on est obligé d'opérer, on doit effectuer certaines corrections sur les résultats immédiats de l'expérience. Elles sont relatives à la température des corps, à celle de l'eau, et enfin à la perte de poids qu'éprouvent les corps pesés dans l'air.

Pour l'eau, en particulier, il est très difficile d'en avoir et d'en maintenir, même une petite quantité, à la température de son maximum de densité. On doit se contenter de la prendre à une température fixe quelconque, soit celle du laboratoire, soit la température 0°, ce qui vaut mieux. On fera subir au résultat une correction, pour le ramener à ce qu'il eût été avec de l'eau à 4°. Cette correction est très simple : elle résulte de la définition même du poids spécifique relatif, et elle est indépendante de la notion de coefficient de dilatation.

Soit P le poids d'un volume V du corps à zéro, soit P'_0 le poids d'un égal volume d'eau à zéro, et soit P'_4 le poids de ce même volume d'eau à 4°. On a l'identité suivante :

$$\frac{P}{P'_4} = \frac{P}{P'_0} \times \frac{P'_0}{P'_4}.$$

Or $\frac{P}{P'_4}$ est, par définition, le poids spécifique relatif du corps ; $\frac{P}{P'_0}$ est le poids spécifique approché, fourni directement par l'expérience ; enfin $\frac{P'_0}{P'_4}$ est, par définition, le poids spécifique de l'eau à zéro par rapport à l'eau à 4°. La correction consistera donc à multiplier le nombre mesuré directement par la densité de l'eau à la température de l'expérience. Or l'étude de la dilatation de l'eau a permis de construire une table des densités de l'eau à toutes les températures usuelles.

127. **Densité des solides.** — 1° *Procédé de la balance hydrostatique.* — Ce procédé est une application immédiate du principe d'Archimède. La balance hydrostatique, ou le support à crémaillère, sert à appliquer le procédé.

Opération. — 1° On attache le corps, par un fil fin, au crochet de l'un des plateaux (fig. 123), et on lui fait équilibre dans l'autre plateau avec de la tare. Puis on enlève le corps et on le remplace par des poids marqués, jusqu'à ce qu'on ait rétabli l'équilibre. Soit P la somme des poids marqués qu'il a fallu employer : P est évidemment le poids du corps (double pesée).

2° On enlève les poids marqués, puis on remet le corps en place, tout en laissant toujours la même tare dans l'autre plateau. On immerge alors le corps complètement dans l'eau d'un vase placé au-dessous.

Fig. 123.

Le corps immergé perdant une partie de son poids, égale à celui de l'eau déplacée (113), on ajoute sur le plateau correspondant un poids P′ qui ramène le fléau à sa première position : P′ représente évidemment le poids de l'eau déplacée sous un volume égal à celui du corps.

On a, par définition, $D = \frac{P}{P'}$.

Remarques. — 1° Ce procédé est très expéditif, puisqu'il permet d'effectuer deux doubles pesées avec trois pesées simples seulement; mais il a l'inconvénient d'être peu précis. Le défaut principal consiste dans la poussée hydrostatique et dans l'attraction capillaire[1] que subit le fil de suspension; il n'est guère possible d'évaluer ces deux effets, et, d'un autre côté, il est difficile de les maintenir constants. On atténue beaucoup ces causes d'erreur en employant un fil de platine très fin, qu'on recouvre d'une légère couche de noir de fumée, pour l'empêcher d'être mouillé par l'eau, et qu'on immerge toujours de la même quantité.

2° Il vaut mieux se servir d'une balance ordinaire que de la balance hydrostatique, car si l'on déplace le fléau, à l'aide de la crémaillère, pour produire l'immersion du corps solide, on ne peut plus compter sur l'exactitude de la double pesée.

2° *Procédé des aréomètres.* — Ce procédé est caractérisé par

1. Voir la définition et l'explication de cette attraction capillaire au chapitre consacré à l'étude des phénomènes *capillaires.*

l'emploi d'appareils flotteurs appelés *aréomètres*[1], dont la construction est fondée sur l'équilibre des corps flottants.

Appareil. — C'est l'aréomètre dit *de Nicholson*[2] qui sert dans ce cas particulier (fig. 124). Il se compose d'un cylindre creux de fer-blanc B, lesté à l'aide d'un cône C rempli de plomb, et surmonté par une tige et un plateau A, qui reçoit des poids ainsi que le corps.

Fig. 124.

Opération. — 1° On place d'abord le corps solide sur le plateau A et l'on ajoute une tare, de manière à produire l'affleurement au point de repère marqué sur la tige. On enlève ensuite le corps et on le remplace par des poids marqués P jusqu'à produire le même affleurement : P représente alors le poids du corps, obtenu par double pesée.

2° On enlève l'aréomètre et l'on transporte le corps sur le plateau inférieur C, en *m*. Le poids total de l'instrument n'est pas changé, et cependant, en le plongeant de nouveau, on remarque qu'il n'affleure plus au même point : cela vient de la perte de poids subie par le solide immergé. Si l'on ajoute alors des poids marqués P′ dans le plateau supérieur jusqu'à ce que l'affleurement se rétablisse, on a le poids du volume d'eau déplacé.

En faisant le quotient de ces deux poids, on a la densité cherchée $D = \frac{P}{P'}$ (dans les conditions de température où l'on a opéré).

Remarques. — 1° Si la substance était plus légère que l'eau, elle tendrait à surnager et ne pourrait demeurer sur le plateau inférieur C. On adapte alors à celui-ci un petit grillage de fil de fer mobile, qui s'oppose à l'ascension du corps, et le reste de l'expérience se fait comme ci-dessus.

2° Ce procédé est peu précis, surtout parce que l'aréomètre est une balance très imparfaite; mais c'est un procédé simple et rapide. Aussi est-il fréquemment employé par les minéralogistes, surtout en voyage, où il est seul praticable.

1. De ἀραιός, ténu, léger, et μέτρον, mesure.

2. C'est à tort que cet appareil est attribué à Nicholson. Il est dû au physicien *français Charles, qui l'appliquait* à la détermination de la densité des solides, *sous le nom d'aréomètre-balance.*

3° *Procédé du flacon.* — Ce procédé, imaginé par Klaproth et perfectionné par Regnault, est le seul vraiment précis : aussi convient-il d'effectuer toutes les opérations qu'il comporte avec de l'eau distillée et à la température de la glace fondante. On a alors le moyen de faire subir au résultat brut des corrections rigoureuses.

Appareil. — On fait usage d'un petit flacon à large goulot, fermé par un bouchon de verre usé à l'émeri. Ce bouchon est foré d'un trou qui se prolonge par une tubulure capillaire, terminée elle-même par un tube court, à grand diamètre (fig. 125). Cette tubulure porte un point de repère *a*, jusqu'où l'on a soin de remplir le flacon à chaque opération : cela s'obtient en plongeant en entier le flacon dans l'eau et en le bouchant pendant qu'il est ainsi immergé.

Fig. 125.

Opération. — 1° Le flacon et la tubulure ayant été complètement remplis, on enlève l'excès d'eau jusqu'au point *a*, au moyen d'un petit rouleau de papier buvard. Puis on place dans l'un des plateaux d'une balance le flacon bien fermé et essuyé avec soin, et, à côté de lui, le corps dont on cherche le poids spécifique, en fragments ou en poudre. On tare avec de la grenaille de plomb, puis on enlève le corps et on le remplace par un nombre de grammes P : c'est son poids dans l'air.

2° On retire le flacon, on le débouche et l'on y introduit le corps ; puis on remet le bouchon en place et l'on pose de nouveau le flacon sur le même plateau. L'équilibre n'a plus lieu, car une certaine quantité d'eau a été expulsée; on ajoute alors des poids du côté du flacon jusqu'à ce que le fléau reprenne son équilibre : c'est le poids d'un volume d'eau égal à celui du corps.

Le quotient $\frac{P}{P'} = D$ représente la densité cherchée.

Remarques. — 1° Dans cette expérience, il importe d'éviter la présence des bulles d'air, soit dans l'eau du flacon, soit à la surface du corps solide : cela fausserait les pesées. On commence par purger d'air, au moyen d'une ébullition prolongée, l'eau qui doit servir aux opérations. Puis, après avoir introduit le corps, soit en poudre, soit en fragments, dans l'eau du flacon, on place celui-ci sous la cloche de la machine pneumatique et on fait le vide ; l'air adhérent au corps ou aux parois du flacon se dégage alors en vertu de sa force élastique.

2° Le principal avantage de ce procédé est qu'on peut opérer sur des fragments de la substance, assez petits pour éviter les cavités intérieures. La précision du procédé n'est limitée que *par la difficulté de poser le bouchon exactement de la même manière dans les opérations successives.*

128. Cas particuliers de la densité des solides. — 1° *Corps solubles dans l'eau* — Si le corps dont on cherche le poids spécifique était soluble dans l'eau, on prendrait le poids spécifique de ce corps par rapport à un liquide dans lequel il ne serait pas soluble. Puis cherchant, par un des procédés que nous allons décrire, le poids spécifique du liquide auxiliaire, on obtiendrait le poids spécifique de la substance donnée en multipliant l'un par l'autre les deux résultats.

Si, par exemple, il s'agit de déterminer la densité du sucre, on opérera, par la méthode du flacon, soit avec de l'huile d'olive, soit avec de l'essence de térébenthine, le sucre étant complètement insoluble dans ces liquides.

2° *Corps solides altérables par les liquides.* — Enfin, il est des substances qu'on ne peut mettre en contact avec aucun liquide sans les altérer : telle est la poudre de guerre ou de chasse. Dans ce cas on détermine d'abord le poids P du corps, puis son volume V, sans le mettre en contact avec aucun des liquides usuels. La densité est donnée par la formule $d = \frac{V}{P}$.

Pour déterminer V, on s'est longtemps servi d'un appareil appelé *voluménomètre*, dans lequel la poudre n'est mise au contact que d'une atmosphère gazeuse. Le principe de la méthode est une application de la loi de Mariotte, que nous exposerons plus tard. Mais nous devons dire dès à présent que cette méthode a dû être abandonnée, par suite d'une cause d'erreur inhérente à la composition des poudres. Le charbon qu'elles contiennent a la propriété de condenser les gaz en proportion variable suivant la pression de l'atmosphère ambiante ce phénomène rend la loi de Mariotte inapplicable et, par suite, l'appareil lui-même inutile. On se contente donc de mesurer le volume d'un poids P de poudre par celui du mercure qu'elle déplace, après qu'on l'a débarrassée, dans le vide, des bulles gazeuses qu'elle retient condensées.

Fig. 126.

129. Densités des liquides. — On emploie pour les liquides la même méthode de détermination que pour les solides et on l'applique à l'aide de trois procédés analogues.

I. *Procédé de la balance hydrostatique.* — Au crochet de l'un des plateaux de la balance on suspend ordinairement une boule de verre creux, convenablement lestée de plomb ou de mercure (fig. 126). On lui fait équilibre dans l'autre plateau avec une tare. On plonge ensuite le corps successivement dans l'eau distillée, puis dans le liquide dont on cherche le poids spécifique : l'équilibre est rompu chaque fois ; les poids P et P' *qu'il faut ajouter* pour le rétablir, représentent le poids de l'eau *déplacée, puis celui* du liquide, à volume égal ; on a $D = \frac{P'}{P}$.

II. *Procédé de l'aréomètre.* — L'aréomètre qu'on emploie pour les liquides est dû à Fahrenheit (fig. 128).

Appareil. — Ce flotteur n'a pas de plateau à la partie inférieure, et il est tout en verre, afin de pouvoir être placé dans toute espèce de liquides. Sa tige porte aussi un point d'affleurement, destiné à obtenir un volume immergé constant; il est lesté à la partie inférieure par une petite boule remplie de mercure.

Opération. — 1° Avant d'expérimenter avec cet aréomètre, on en détermine le poids avec précision : soit Q ce poids.

2° On fait flotter l'aréomètre dans une éprouvette remplie d'eau distillée et l'on ajoute des poids dans la capsule supérieure jusqu'à ce que le point d'affleurement atteigne le niveau de l'eau. En cet état (118), le poids de l'aréomètre, ajouté au poids qui est dans la capsule, représente le poids d'un volume d'eau égal à celui de la partie immergée de l'instrument. Soient p la somme des poids marqués mis sur le plateau supérieur et P le poids total du volume d'eau déplacé, on a $P = Q + p$.

Fig. 127.

Fig. 128.

3° On détermine de la même manière le poids d'un égal volume du liquide et l'on a $P' = Q + p'$.

On a alors, par définition,

$$D = \frac{P'}{P} = \frac{Q + p'}{Q + p}.$$

III. *Procédé du flacon.* — Pour les liquides, on fait usage d'un petit flacon de forme spéciale (fig. 128).

Appareil. — Il se compose d'un réservoir cylindrique b auquel est soudée une tige capillaire, puis à celle-ci un tube plus gros a, qu'on peut fermer par un bouchon de verre (dans le cas où l'on expérimente sur des liquides volatils). Sur la tige capillaire est un point de repère c, qui sert à marquer un volume constant de liquide.

Opération. — 1° On commence par remplir le flacon. On intro-

duit dans le réservoir un tube très fin, soit un tube filiforme en verre étiré, soit un tube capillaire en argent : tel était celui qu'employait Regnault, sous le nom de *fil capillaire d'argent*. On verse le liquide dans l'entonnoir supérieur et l'on aspire l'air intérieur : la pression atmosphérique fait alors pénétrer le liquide dans le réservoir inférieur. Le tube capillaire sert encore à expulser les bulles d'air adhérentes au verre et à enlever l'excès du liquide. Ce procédé étant susceptible d'une grande précision, il convient d'opérer à zéro. Pour cela, après avoir rempli le flacon à la température ambiante, on le porte dans la glace fondante et, quand il en a pris la température, on enlève l'excès du liquide au-dessus du repère. On lui laisse reprendre la température extérieure avant de le peser, afin d'éviter le dépôt de rosée sur le flacon pendant l'opération.

2° On place d'abord le flacon plein d'air sur l'un des plateaux de la balance, et l'on met sur le même plateau des poids marqués dont la somme soit supérieure au poids probable du liquide le plus lourd qui doit remplir le flacon; puis on fait la tare.

3° On remplit ensuite le flacon du liquide le moins lourd, comme il vient d'être dit; on l'essuie, on le laisse revenir à la température ambiante et on le replace sur le plateau. L'équilibre est détruit et, pour le rétablir, il suffit d'enlever une portion des poids marqués. Soit P la somme de ces poids enlevés : c'est le poids, obtenu par double pesée, d'un volume du liquide égal à celui du flacon à 0°.

4° On remplit ensuite le même flacon du second liquide, puis on le replace sur le plateau. L'équilibre précédent sera évidemment rompu, mais on n'aura qu'à enlever encore quelques poids marqués pour le rétablir de nouveau : soit P′ la somme des poids enlevés dans les deux opérations successives, P′ est le poids d'un volume du liquide égal au volume du flacon à 0°.

5° En faisant le quotient de ces deux poids (supposons que P′ corresponde à l'eau), on a la densité cherchée $D = \frac{P}{P'}$.

C'est la densité à 0° du liquide par rapport à l'eau à 0°; $\frac{P}{P'} e_0$ représenterait sa densité à 0° par rapport à l'eau à 4°.

Méthode des colonnes liquides équivalentes. — On peut employer une autre méthode qui est une application des conditions d'équilibre de deux liquides superposés dans deux vases communicants.

En effet, supposons que l'une des branches du tube (fig. 122) contienne de l'eau et l'autre branche de l'huile, et que les hauteurs respectives des colonnes liquides qui se font équilibre soient 38 centimètres pour l'huile et 35 pour l'eau.

La densité de l'eau étant prise pour unité, si l'on représente par x celle de l'huile, on a l'équation d'équilibre

$$\frac{38}{35} = \frac{1}{x}; \qquad \text{d'où} \qquad x = \frac{35}{38} = 0{,}921.$$

Remarque. — Nous verrons plus tard que cette méthode a été utilisée par Dulong et Petit, puis par Regnault, pour comparer les densités du mercure à différentes températures et pour en déduire la loi de dilatation de ce liquide.

ARÉOMÈTRES.

130. Différents types d'aréomètres. — On construit deux sortes d'aréomètres : les aréomètres dits *à volume constant et à poids variable* et les aréomètres *à poids constant et à volume variable.*

Les aréomètres de Nicholson et de Fahrenheit, que nous avons décrits précédemment, appartiennent à la première catégorie. Ils sont *à volume constant*, parce qu'on les fait toujours plonger jusqu'au même trait d'affleurement, et *à poids variable*, parce qu'on réalise cette immersion en les chargeant de poids qui *varient* avec les solides ou les liquides sur lesquels on expérimente. Leur unique usage est la détermination, approximative mais rapide, des densités.

Les aréomètres de la deuxième espèce sont dits *à volume variable et à poids constant*, parce qu'ils n'ont pas le point d'affleurement fixe et conservent toujours le même poids. Ces instruments servent, dans la pratique (sous les noms divers de *pèse-sels*, *pèse-acides*, *pèse-liqueurs*), pour déterminer rapidement non pas la densité, mais le degré de concentration des dissolutions salines, des acides et des liqueurs alcooliques.

131. **Aréomètres de Baumé.** — *Description.* — Baumé, pharmacien à Paris, construisit, au commencement de ce siècle, deux types d'aréomètres à poids constants, dont l'usage est encore très répandu. Ce sont des flotteurs de verre, formés d'une tige graduée à laquelle est soudée une cavité sphérique (fig. 129) ou cylindrique (fig. 131) remplie d'air, suivie elle-même d'une boule plus petite, qui est pleine de mercure servant de lest.

Graduation. — L'un de ces instruments doit servir pour des liquides plus denses que l'eau, tels que les acides, les sirops ou les dissolutions salines : on l'appelle *pèse-acides* ou *pèse-sels* ; l'autre doit servir pour des liquides moins denses que l'eau, tels que les éthers, les solutions ammoniacales, les liqueurs alcooliques ou *esprits* : on l'appelle *pèse-esprits ou pèse-liqueurs.* En vue de

chacun de ces usages, Baumé adopta un mode particulier de graduation arbitraire.

Fig. 129.

1° *Pèse-acides, pèse-sels, pèse-sirops.* — On règle le poids de l'instrument (on le *leste*) de manière que, dans l'eau pure, à la température de 12°,5 centigrades (ou 10° Réaumur), il s'enfonce à peu près jusqu'à l'extrémité supérieure de sa tige : en ce point A, on marque 0° (fig. 129). Puis on plonge l'instrument dans une dissolution de 85 parties d'eau en poids et de 15 de sel marin. Ce liquide (dont le poids spécifique est 1,116), étant plus lourd que l'eau pure, l'appareil ne s'y enfonce que jusqu'à un point B, où l'on marque 15. On partage enfin l'intervalle des points A et B en 15 parties égales, et l'on continue les divisions jusqu'au bas de la tige. Cette tige doit être assez longue pour porter 70 degrés environ dans les pèse-acides. Ces divisions sont ordinairement marquées sur une bande de papier qu'on introduit dans l'intérieur de la tige.

L'aréomètre ainsi construit ne peut évidemment servir que pour les liquides où il s'enfoncera *moins* que dans l'eau, c'est-à-dire pour les liquides plus denses que l'eau.

Fig. 130.

2° *Pèse-esprits, pèse-liqueurs.* — Sur les instruments destinés aux liquides moins denses que l'eau, le zéro devra nécessairement se trouver au bas de la tige (fig. 130). On marque 0 au point d'affleurement dans une dissolution de 90 parties, en poids, d'eau distillée et de 10 parties de sel marin (densité = 1,0847) et l'on marque 10 au point d'affleurement dans l'eau distillée (à la température de 12°,5 C). Ce dernier point est nécessairement au-dessus du précédent sur la tige de l'aréomètre, puisque l'eau pure est moins dense que la dissolution saline. On divise ensuite l'intervalle de ces deux points en 10 parties égales et on prolonge les divisions jusqu'au sommet de la tige qui doit pouvoir porter de 58 à 60 degrés.

Usages. — Ces deux aréomètres, étant gradués d'une manière tout à fait arbitraire, ne peuvent indiquer ni les densités des liquides ni les quantités de sel dissoutes. Cependant ils sont avantageusement employés pour reconnaître si une solution saline ou acide a été portée à un point de concentration déterminé. On sait, par exemple, que le pèse-acides doit marquer :

66 dans l'acide sulfurique concentré,
36 dans l'acide nitrique du commerce,
22 dans l'acide chlorhydrique ordinaire,
5 dans l'eau de mer (à la température de 22° C.).

On sait aussi que le même instrument doit marquer, à froid :

35 dans un sirop bien confectionné.

Cela permet, dans la fabrication des sirops, de surveiller méthodiquement la marche de leur concentration.

De même, le pèse-esprits doit marquer normalement :

36 dans l'éther ordinaire du commerce,
65 dans l'éther ordinaire rectifié,
De 22 à 25 dans l'ammoniaque du commerce, plus ou moins concentrée.

Remarque. — *Autre mode de graduation du pèse-acides.* — On peut substituer à la dissolution saline de Baumé l'un quelconque des liquides précédents, dont le degré est bien connu. Ainsi, l'on peut prendre comme points fixes : 1° le point d'affleurement dans l'eau pure, où l'on marquera 0 ; 2° le point d'affleurement dans l'acide sulfurique concentré, où l'on marquera 66. On continuera la graduation comme précédemment. Ce procédé expéditif sert fréquemment aux constructeurs.

132. **Aréomètre de Cartier.** — On a longtemps employé dans la régie française, comme pèse-esprits, l'aréomètre de Cartier. Ce n'était pas autre chose qu'un aréomètre Baumé dont la graduation avait été légèrement modifiée, ou plutôt altérée par Cartier, dans une intention de concurrence commerciale. Il conservait le degré 10 pour le point d'affleurement dans l'eau pure, et établissait à partir de ce degré une division arbitraire en degrés égaux, sans prendre de second point fixe. Le degré 29 de cette échelle coïncidait approximativement avec le degré 31 de l'aréomètre Baumé. C'est à l'échelle de cet instrument que se rapportent les dénominations usuelles d'alcools à 25°, à 30°, à 40°, et d'eaux-de-vie à 19°, à 20°, à 22°. Mais elles tendent à disparaître de plus en plus, pour faire place aux indications de l'alcoomètre centésimal.

133. **Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac.** — *Définition.* — L'*alcoomètre centésimal* est un aréomètre à poids constant, imaginé par Gay-Lussac pour mesurer la *force* des liquides spiritueux *à* 15° C., c'est-*à-dire le nombre de centièmes* d'alcool pur, en volume, *que contiennent ces liquides à cette* température.

Description et usage. — La forme de l'alcoomètre est analogue à celle du pèse-esprits de Baumé (fig. 131); mais la graduation en est différente : elle est complètement empirique. L'échelle, portée par la tige, est divisée en 100 parties, dont chacune représente un centième d'alcool en volume : le degré 0 correspond à l'eau pure, et le degré 100 à l'alcool absolu. Plongé dans un liquide spiritueux à la température de 15°, l'alcoomètre en donne immédiatement la *force*, parce que la graduation a été faite à cette température. Par exemple, si à 15° l'alcoomètre s'enfonce dans une eau-de-vie jusqu'à la division 48, cela indique que cette eau-de-vie contient 48 centièmes de son volume d'alcool pur et le reste d'eau.

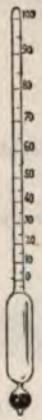


Fig. 131.

Graduation. — On établit l'échelle de l'alcoomètre en plongeant successivement l'instrument dans des mélanges d'alcool et d'eau faits dans des proportions connues, à la température fixe de 15°. Cette opération demande des précautions particulières, à cause du phénomène suivant.

Lorsqu'on mélange un volume V d'alcool absolu avec un volume V′ d'eau pure, le volume total V″, qui devrait être égal à V + V′, est plus petit que V + V′. Il y a donc eu une contraction; de plus, cette contraction est variable avec les volumes V et V′ qui sont mélangés. La contraction est maximum pour un mélange de 52,3 parties d'alcool et de 47,7 d'eau (en volume) et elle est alors égale à 3,65 pour 100. Il faut donc en tenir compte dans la graduation.

Pour cela, on prend une éprouvette à pied, graduée en 100 parties égales, et, y ayant versé de l'alcool absolu jusqu'à la division 95, on achève de la remplir jusqu'à 100 avec de l'eau distillée : on obtient ainsi un mélange qui contient certainement 95 pour 100 d'alcool absolu, et si l'on y plonge l'instrument, il est légitime de marquer 95 au point d'affleurement. On vide alors l'éprouvette, on y verse de l'alcool jusqu'à 90, et l'on achève encore de remplir jusqu'à 100 avec de l'eau distillée : cela donne évidemment un mélange qui contient 90 pour 100 d'alcool absolu; on peut donc marquer 90 au point d'affleurement de l'alcoomètre dans cette dernière liqueur. On détermine de la même manière tous les degrés, de 5 en 5, depuis 90 jusqu'à la division 5. Enfin, l'on marque 100° dans l'alcool absolu et 0° dans l'eau pure; on *divise en cinq* parties égales chacun des intervalles de 5 en 5, et *l'instrument est gradué.*

Remarques. — 1° Il importe d'observer que, l'alcoomètre de Gay-Lussac ayant été gradué à 15°, ce n'est qu'à cette température que ses indications sont exactes. A des températures plus hautes ou plus basses, les liquides alcooliques se dilatent ou se contractent et deviennent, par conséquent, plus légers ou plus denses : de sorte que l'instrument s'y enfonce plus ou moins, bien que leur richesse en alcool n'ait pas varié. Entre 0° et 30° C., l'erreur ainsi commise peut aller jusqu'à 30 pour 100 de la force de la liqueur.

Table de correction. — On peut corriger cette erreur à l'aide d'une table de correction, construite par Gay-Lussac. C'est une table à double entrée qui contient dans une colonne verticale les températures de zéro à 30°, et dans une colonne horizontale les degrés de l'alcoomètre de zéro à 100. Par exemple, une eau-de-vie étant à la température de 22°, et l'alcoomètre y marquant 56, on trouve dans la table que la richesse réelle de cette liqueur est 55 : c'est-à-dire qu'elle contient les 55 centièmes de son volume d'alcool, et, par suite, 67 centièmes d'eau.

Formule de correction. — On peut aussi faire cette correction à l'aide d'une formule empirique qui comprend tous les nombres inscrits dans la table. En appelant x le degré cherché, n le degré observé à la température de l'expérience $(15 + \theta)$, et b un coefficient, qui est égal à 0,4, on a

$$x = n - b\theta.$$

Si la température de l'expérience est inférieure à 15°, on commet une erreur par défaut, et la correction doit être négative. Le degré corrigé x est alors

$$x = n + b\theta.$$

154. **Extension de la graduation centésimale aux pèse-sels, pèse-lait, pèse-vins, pèse-urine.** — On construit aussi des pèse-sels gradués d'après le principe de l'alcoomètre centésimal. Ces instruments permettent de déterminer immédiatement la quantité de tel ou tel sel qui est contenue dans une certaine dissolution. Leur zéro correspond toujours à l'eau pure. On marque successivement 5, 10, 15, 20... aux différents points d'affleurement dans des dissolutions qui contiennent 5, 10, 15, 20... parties de sel ; puis on divise chaque intervalle en 5 parties égales.

Ce mode de graduation offre un inconvénient : c'est qu'il faut un pèse-sels spécial pour chaque espèce de sel. Un instrument qui aurait été gradué pour l'azotate de potasse, par exemple, donnerait des indications complètement fausses dans une dissolution de carbonate de potasse ou de tout autre sel.

On construit d'après le même principe des *pèse-lait* et des *pèse-vins*, destinés à mesurer la quantité d'eau qu'on peut avoir introduite par fraude dans ces liquides ; mais ces instruments ne présentent pas une utilité réelle, parce que, les densités du lait et du vin étant très variables, même lorsque ces liquides sont parfaitement naturels, on pourrait attribuer à la fraude ce qui serait dû uniquement à la mauvaise qualité naturelle du lait ou du vin. Plusieurs médecins font aussi usage du *pèse-urine*, fondé sur le même principe.

155. **Graduation par comparaison.** — Pour tous les aréomètres centésimaux d'une même catégorie, par exemple pour tous les alcoomètres, il est inutile de répéter la série des opérations que comporte la graduation de Gay-Lussac ; il suffit de graduer empiriquement, par la méthode indiquée, un étalon de chaque espèce ; on peut ensuite graduer les autres par comparaison.

Principe de la méthode. — Cette méthode de graduation est fondée sur ce fait que *les échelles de deux alcoomètres* (ou de deux aréomètres centésimaux de même espèce) *sont semblables*. Cela veut dire que le *rapport des capacités* u et u_1, qui correspondent à la *longueur de 1 degré* dans chaque échelle, est un nombre *constant*.

Ce fait est une conséquence directe des conditions d'équilibre des corps flottants. En effet, soient deux aréomètres de poids P et P_1, qu'on suppose gradués l'un et l'autre par la méthode de Gay-Lussac : ces deux instruments doivent marquer le même degré N lorsqu'on les plonge dans un même liquide de densité d. L'équation d'équilibre sera,

pour le premier $$P = Nud,$$

et pour le second $$P_1 = Nu_1 d.$$

En divisant ces deux équations membre à membre, il vient

$$\frac{P}{P_1} = \frac{u}{u_1}.$$

Le rapport des degrés $\frac{u}{u_1}$ étant constant pour deux instruments de poids P et P_1, il en résulte nécessairement que les deux échelles sont semblables.

Opération. — La graduation se fera très simplement en utilisant cette similitude, à la condition toutefois de supposer les tiges des instruments parfaitement

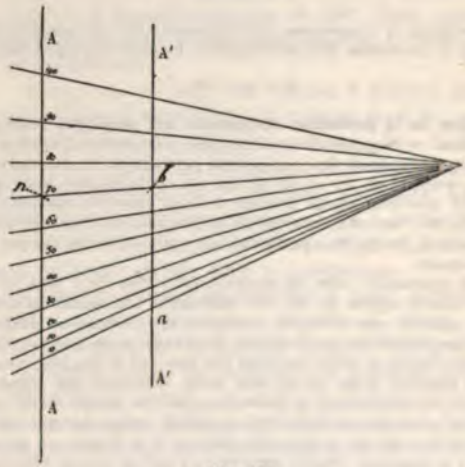


Fig. 152.

calibrées, car alors la division en parties de capacités semblables se ramènera à une division en parties de longueurs semblables. On commencera par porter l'échelle AA de l'étalon sur une feuille de papier (fig. 152), puis d'un point I quelconque on mènera une système de transversales allant aux divers degrés de l'échelle-type. Cette construction graphique préliminaire servira à la graduation de tous les instruments de même espèce.

Pour l'un quelconque de ces instruments, on déterminera directement le *degré 0, puis le degré n*, en le plongeant successivement dans l'eau pure, puis *dans une dissolution qui marque n* à l'aréomètre étalon. Soit ab cet intervalle

$(0-n)$ sur l'instrument à graduer; il a une capacité égale à nu_1; de même l'intervalle $(0-n)$ sur l'étalon a une capacité égale à nu : en comparant ces deux intervalles $\frac{nu}{nu_1}$, on aura le rapport de similitude cherché $\frac{u}{u_1}$. Cette comparaison s'opère graphiquement de la manière suivante. On cherche sur la feuille de papier une parallèle A'A' à AA, qui ait entre les transversales lo et la, une longueur précisément égale à ab : cette parallèle A'A' sera évidemment divisée, par le système de transversales, en parties proportionnelles au rapport $\frac{u}{u_1}$, et elle représentera exactement l'*échelle cherchée*.

136. Densimètres et volumètres. — 1° *Définition.* — On appelle ainsi des aréomètres à poids constant qui sont gradués rationnellement, de manière à indiquer tout de suite soit les *densités* des liquides où on les plonge, soit leurs *volumes spécifiques*, c'est-à-dire les *volumes de l'unité de poids* de ces liquides. Ces instruments ont été imaginés par Gay-Lussac. Leur forme est analogue à celle des aréomètres de Baumé; mais il est très important que leurs tiges soient parfaitement calibrées.

2° *Principe de la graduation.* — Supposons que l'on marque 100 au point d'affleurement de l'instrument (fig. 155) dans l'eau pure à 4°. Ce point est considéré comme le 100e degré d'une division en parties d'égale capacité, dont le zéro serait à la partie inférieure de l'instrument; celui-ci est supposé parfaitement cylindrique, de manière que les parties d'égale longueur aient la même capacité. Soit u le volume d'une division, et soit P le poids total de l'instrument, on a évidemment

$$P = 100u. \tag{1}$$

Si l'on plonge l'instrument dans un liquide quelconque, de densité x et qu'il s'y enfonce jusqu'au degré N, on aura

$$P = Nux. \tag{2}$$

Donc : 1° Le volume occupé par un poids P du liquide sera Nu et le *volume spécifique* y du liquide sera donné par l'équation

$$y = \frac{Nu}{P} = \frac{Nu}{100u} = \frac{N}{100};$$

2° La densité du liquide sera donnée par l'équation

$$100u = Nux, \qquad \text{d'où} \qquad x = \frac{100}{N}.$$

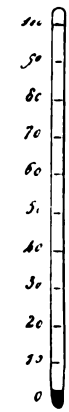


Fig. 155.

Remarque. — Si, au lieu d'eau pure à 4°, on avait pris de l'eau pure à t°, ce qui est le cas ordinaire, il n'y aurait pas d'autres changements que l'introduction du facteur e, densité de l'eau, dans l'équation (1) et dans ses conséquences. On aurait

$$P = 100ue \qquad \text{et} \qquad x = \frac{100e}{N}, \quad y = \frac{100e}{N}.$$

3° *Différence entre les densimètres et les volumètres.* — Tous ces instruments, ainsi gradués, donnent donc à première vue le *volume spécifique* des liquides. Au contraire, il faut faire un calcul pour avoir la *densité* du liquide. Pour transformer le volumètre en densimètre, il suffit d'effectuer d'avance le calcul pour tous les degrés de l'échelle volumétrique, et d'inscrire la densité correspondante en face de chaque degré.

APPLICATIONS DIVERSES.

137. **Niveau d'eau.** — *Principe et description.* — Le *niveau d'eau* est un instrument d'arpentage, dont la construction est fondée sur les conditions d'équilibre d'un liquide contenu dans des vases communicants. Il se compose d'un tube de fer-blanc ou de laiton, coudé à ses deux extrémités; à celles-ci sont adaptés deux tubes de verre D et E (fig. 134) où l'on verse de l'eau colorée

Fig. 134.

jusqu'aux 3/4 environ de leur hauteur. Tout l'appareil est disposé horizontalement sur un pied à trois branches. L'équilibre étant établi, d'après le principe des vases communicants les surfaces libres du liquide, en D et en E, sont dans un même plan horizontal.

Usages. — Cet instrument sert à *prendre des nivellements*, c'est-à-dire à déterminer la *différence des niveaux* entre deux points ou, autrement dit, leur distance verticale.

Soit à chercher de combien un point B du sol est au-dessus d'un autre point A. On place en ce dernier point une *mire*. C'est une règle de bois formée de deux tiges à coulisse, et terminée par une plaque de fer-blanc M, qu'on appelle le *voyant*, et qui porte à son centre un point de repère. Cette mire étant disposée

verticalement en A, un observateur, placé près du niveau, dirige, tangentiellement aux surfaces D et E, un rayon visuel vers la mire, et fait signe à un aide, qui la tient, de l'allonger ou de la raccourcir jusqu'à ce que le point de repère se trouve sur le prolongement de la ligne DE. Transportant alors la mire au point B, on répète la même opération. La distance entre la deuxième position de la mire et la première position mesure la distance verticale des points A et B.

On peut encore opérer en plaçant le niveau dans un lieu intermédiaire entre les deux points. On vise une mire placée successivement en ces deux points, et la différence des hauteurs du voyant, dans les deux visées, donne la distance verticale des deux points.

Nivellement simple et nivellement composé. — L'une ou l'autre de ces opérations constitue le *nivellement simple*. Elles suffisent dans tous les cas où les deux points sont assez rapprochés pour qu'on puisse faire la visée avec précision. Lorsque les points sont très éloignés, on établit entre eux des stations intermédiaires où l'on fait des nivellements successifs. La différence de niveau cherchée est la somme des nivellements partiels. Cette opération s'appelle le *nivellement composé*.

138. Niveau à bulle d'air. — *Description, réglage et usages.* — Le *niveau à bulle d'air* est un instrument de précision dont la construction est fondée sur la condition d'équilibre d'un liquide et d'un fluide superposés dans un même vase.

Fig. 135.

Il consiste en un tube de verre faiblement cintré, qu'on remplit d'un liquide très fluide, comme l'alcool ou l'éther, en y conservant une petite bulle d'air (fig. 135). Ce tube, étant soudé à la lampe à ses deux extrémités, est renfermé dans un étui en laiton CD, muni d'une large échancrure par où se voit une graduation tracée sur le verre, à sa partie supérieure. Cette gaine est ordinairement fixée sur une règle de même métal, dressée avec soin, qui sert de support à l'instrument.

Le niveau étant *posé sur un plan quelconque*, dès que les deux

fluides intérieurs sont en équilibre, leur surface de séparation, qui est la surface du liquide, devient parfaitement horizontale, et la bulle d'air va se loger dans la partie la plus élevée du tube. La ligne idéale qui joindrait ses extrémités, étant une droite de la surface de séparation, est donc une ligne horizontale quelle que soit l'orientation du plan d'appui. Elle couperait l'échelle graduée du tube en deux traits, qui seraient variables avec l'orientation du plan d'appui. Mais si ce plan d'appui est horizontal, la bulle d'air vient se loger entre deux traits, qui définissent alors une ligne horizontale : ces deux traits seront toujours les mêmes toutes les fois que le niveau sera posé sur un plan horizontal; ils constituent donc deux repères fixes b et b' (fig. 136), où l'on marque ordinairement 0 0. La ligne bb' ou 0 0 s'appelle la *ligne de repères* du niveau.

Fig. 136.

Réglage du niveau. — On dit qu'un niveau à bulle d'air est *réglé*, lorsque la ligne des repères est *parallèle à la base du niveau*. Le réglage est une opération qu'on doit faire soi-même et répéter de temps en temps avant de se servir de l'instrument. Voici en quoi elle consiste.

1° On vérifie d'abord si le niveau est réglé ou non. Pour cela on le pose sur un plan fixe à peu près horizontal, puis on cherche, par tâtonnements, une position pour laquelle la bulle vienne se placer entre ses repères. On retourne alors l'instrument bout pour bout et sur place. S'il est réglé, la bulle vient se replacer entre ses points de repère.

Fig. 137.

Fig. 138.

En effet, soit MN la base du niveau et bb' la ligne des repères. Quand on *retourne le niveau bout* pour bout, il effectue un mouvement de rotation *autour de l'axe YY'*, perpendiculaire au plan de la base MN : le point M vient *en N, et réciproquement* (fig. 137). Si la ligne bb' est parallèle à la base, elle

sera perpendiculaire au même axe et exécutera autour de lui un mouvement de rotation : le point b viendra donc en b', et réciproquement. Quant à la bulle, elle n'a pas bougé pendant le mouvement, parce qu'elle est assujettie à occuper toujours les points les plus élevés du tube ; elle se retrouvera donc dans la même position par rapport aux repères.

2° Supposons, au contraire, que la ligne des repères soit oblique par rapport à MN, par exemple, dans la position bb' (fig. 138). L'opération du retournement la mettra dans une position $b_1 b'_1$, symétrique par rapport à l'axe de rotation YY'. La bulle elle-même n'a pas changé de place : elle fait donc un angle bYb'_1 avec la nouvelle position de la ligne des repères. Cet angle est double de celui que fait celle-ci avec la ligne MN. Donc, en inclinant le niveau par rapport à son plan de l'angle $N_1Yb_1 = \frac{1}{2} bYb'_1$, on produira le parallélisme de bb' et de MN, et le niveau sera réglé.

On peut toujours obtenir ce résultat par tâtonnements. Dans les niveaux de précision, la monture métallique est mobile autour d'un axe O. L'autre extré-

Fig. 139.

mité O' traverse librement une vis fixée à la base MN. Un ressort à boudin r tend à pousser cette extrémité de bas en haut, mais elle est maintenue dans une position fixe par un écrou mobile E (fig. 139).

Usages du niveau à bulle d'air. — L'instrument, ainsi réglé, peut servir aux trois opérations suivantes :

1° Rendre un axe ou un plan horizontal ;
2° Mesurer l'inclinaison d'une droite donnée ;
3° Rendre un axe vertical.

1° Quand le niveau doit s'appliquer sur un axe horizontal, il est porté par deux fourchettes, pouvant s'adapter à deux tourillons de même diamètre. Nous verrons ce dispositif dans le cathétomètre, et nous décrirons, à propos du réglage de cet instrument, l'emploi du niveau pour rendre un axe horizontal.

Quand le niveau doit servir à rendre un plan horizontal, sa monture est munie d'une base plane qu'on place sur une droite quelconque du plan. Celui-ci est ordinairement un trépied en forme de triangle, muni de trois vis calantes (fig. 140). On commence par disposer le *niveau parallèlement à la direction des têtes*

de deux vis (fig. 140, I), et l'on agit sur l'une de celles-ci jusqu'à ce que la bulle vienne se fixer entre ses repères : à ce moment, la base du niveau et, par suite, la ligne du plan d'appui, qui coïncide avec la base, est une horizontale. Cela fait, on place le niveau dans une position sensiblement perpendiculaire à la première

Fig. 140.

(fig. 142, II), et l'on rend cette direction horizontale, en agissant sur la troisième vis du plan. Si cette deuxième opération n'a pas altéré l'horizontalité de la ligne des deux autres vis, on peut en conclure que le plan est horizontal, puisqu'il contient deux lignes horizontales. Mais, en général, la première horizontale a été plus ou moins inclinée par la deuxième opération. On recommence alors la première opération, puis la seconde, méthodiquement, jusqu'à ce que le résultat de l'une ne soit nullement altéré par l'autre, et l'on arrive ainsi assez rapidement à l'horizontalité permanente des deux directions : le plan d'appui est alors *horizontal*.

2° Pour mesurer l'inclinaison d'une droite, ou d'un plan, inclinés sur l'horizon, il faut connaître la valeur angulaire d'une division de l'échelle du niveau. On opère cette graduation préalable d'une manière empirique, à l'aide d'un appareil spécial, appelé *comparateur de niveau*. Cet appareil se compose d'un plan mobile autour d'un axe horizontal, et dont on peut modifier à volonté l'inclinaison de quantités connues, en lui communiquant son mouvement à l'aide d'une vis micrométrique verticale, munie d'un tambour gradué, comme celle du sphéromètre.

3° Enfin nous verrons, à propos du cathétomètre, comment le niveau peut servir à rendre un axe vertical.

139. **Cours d'eau. — Jets d'eau. — Puits artésiens.** — Les mers, les sources, les rivières, sont autant de vases communicants dans lesquels les eaux tendent sans cesse à prendre un même niveau. Il en est de même des jets d'eau artificiels et des bornes-fontaines.

La figure 141 suffit pour éclaircir la théorie de toutes ces applications naturelles ou industrielles. Si l'on verse de l'eau dans l'une des branches en U du tube (I), le liquide s'élève dans l'autre branche, et, lorsque l'équilibre est établi, les niveaux *a* et *b* sont à une même hauteur. Supposons maintenant que le tube ait des branches inégales (II), la plus grande étant surmontée d'un réservoir plein d'eau, et la plus courte étant munie d'un robinet. Si celui-ci est d'abord fermé, et que le niveau dans la grande branche dépasse de la hauteur *cd* le niveau dan la petite branche, le liquide cera sur le robinet une pres équivalente au poids d'une lonne liquide ayant pour teur *cd* et pour base la section de la petite branche. Si donc on ouvre le robinet, l'eau jaillira verticalement, en vertu de cette pression. La hauteur du jet devrait être égale à *cd*, mais elle est plus ou moins diminuée par la résistance qu'opposent au mouvement ascensionnel de l'eau d'abord le frottement de l'eau contre les parois du tube et puis la masse d'air déplacée par le jet.

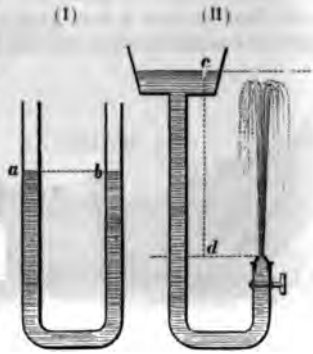


Fig. 141.

Le même principe s'applique à la théorie des *puits artésiens*[1] : ce sont des sources artificielles, à eaux généralement jaillissantes.

Ces puits sont des trous très étroits, forés à la sonde, et d'une profondeur très variable, qui pénètrent jusqu'à une nappe d'eau souterraine emprisonnée entre des couches imperméables. Remarquons en effet que les terrains qui composent l'écorce du globe sont, les uns perméables aux eaux, comme les sables, les graviers; les autres imperméables, comme les argiles. Supposons donc un bassin géographique H, plus ou moins étendu, au-dessous duquel gisent deux couches imperméables, AB, CD (fig. 142), comprenant entre elles une couche perméable KK : si cette dernière est en communication avec des terrains plus élevés, à travers lesquels s'infiltrent les eaux des pluies, ces eaux suivront la pente

1. Ainsi nommés parce que c'est dans l'ancienne province d'Artois qu'ils ont d'abord été creusés. On y en rencontre dont l'origine paraît remonter à la fin du XIIe siècle. A une époque beaucoup plus reculée, des puits de ce genre ont été creusés en Chine et en Égypte.

naturelle du terrain à travers la couche perméable et se rendront au-dessous du bassin géographique. Là elles s'accumuleront, sans pouvoir communiquer avec la couche superficielle, dont elles sont séparées par la couche imperméable AB. Mais si, à partir du sol, on pratique un trou qui traverse cette couche, les eaux, tendant toujours à se mettre de niveau (fig. 142), s'élèvent dans ce trou à une hauteur d'autant plus grande, qu'elles sont en communication avec un terrain d'affleurement plus élevé.

Fig. 142.

Et, en effet, on a constaté que le niveau hydrostatique[1] d'un puits foré n'est pas invariable, mais qu'il monte ou qu'il descend suivant que les cours d'eau du pays où affleure la couche aquifère sont eux-mêmes en hausse ou en baisse.

Puits forés de Grenelle et de Passy (Paris). — Les eaux qui alimentent les puits artésiens viennent souvent d'une distance de vingt à trente lieues. Quant à la profondeur, elle varie avec les localités. Le puits foré de Grenelle a 548 mètres de profondeur; l'eau qui s'en échappe possède en toute saison une température de 27°, et son niveau hydrostatique est d'environ 33 mètres. Celui de Passy a 570 mètres de profondeur; l'eau s'en échappe à la température de 20°. Ces deux puits sont alimentés par une même couche de sable aquifère, qui est surmontée par une épaisse série de roches, et qui ne va affleurer qu'à la hauteur du plateau de Langres. C'est là, par conséquent, dans toute l'étendue de cet affleurement, que se trouve le bassin d'alimentation de ces puits (analogue au réservoir de la figure 141, II).

1. On appelle *niveau hydrostatique* d'un *puits foré* la hauteur à laquelle *s'élève l'eau du* puits dans le tube même qui a servi au forage. On laisse ce *tube dans le trou, comme* un tuyau de conduite, pour empêcher la déperdi*tion de l'eau à travers* les couches perméables de la coupe.

LIVRE IV

PNEUMATIQUE

CHAPITRE PREMIER

STATIQUE DES GAZ

PRESSION ATMOSPHÉRIQUE ET BAROMÈTRES.

140. Caractères physiques et propriétés des gaz. — On appelle *gaz* ou *corps gazeux* toutes les substances qui, dans les conditions atmosphériques ordinaires, se présentent sous le troisième état physique, ou *état gazeux*, défini précédemment. L'air est le type des gaz[1].

Leurs propriétés caractéristiques sont la *fluidité*, la *pesanteur*, l'*élasticité*, — qui leur sont communes avec les liquides, — la *compressibilité* et l'*expansibilité*.

Pesanteur des gaz. — *Les gaz sont pesants*, comme les liquides et comme tous les autres corps. Cette proposition, qui paraît si évidente aujourd'hui, fut à peine soupçonnée par les anciens[2] et ne fut pas démontrée expérimentalement avant Galilée. Il établit que *l'air est pesant*, en faisant voir qu'un récipient où l'on comprime de l'air augmente de poids[3]; l'accroissement de poids représente évidemment le poids de l'excès d'air introduit.

On démontre aussi le même fait par une expérience inverse, due à Otto de Guericke. On suspend au fléau d'une balance

1. Du moins au point de vue physique, car on sait depuis Lavoisier que l'air n'est pas un gaz simple, mais un mélange de deux gaz simples, l'oxygène et l'azote.

2. Aristote dit dans son traité *de Cœlo* : « Tous les corps, quand ils sont en leur lieu propre, ont de la pesanteur, excepté le feu. L'air lui-même est pesant. »

3. Galilée, *Dialogues des sciences naturelles*, première journée.

très sensible un ballon de verre de 3 à 4 litres, dont le col est muni d'un bon robinet. On tare d'abord ce ballon plein d'air; puis on y fait le vide : on constate alors que l'équilibre est détruit. Pour le rétablir, il faut ajouter du côté du ballon quelques grammes, qui représentent évidemment le poids de l'air extrait.

On peut opérer autrement. On commence par faire le vide dans le ballon, puis on tare le ballon vide, en ayant soin de mettre préalablement quelques grammes dans le plateau, du même côté. On ouvre alors le robinet; l'air rentre dans le ballon avec un sifflement caractéristique et le fléau s'incline de ce côté. On rétablit l'équilibre en enlevant un certain nombre de grammes, qui représentent évidemment le poids de l'air rentré[1].

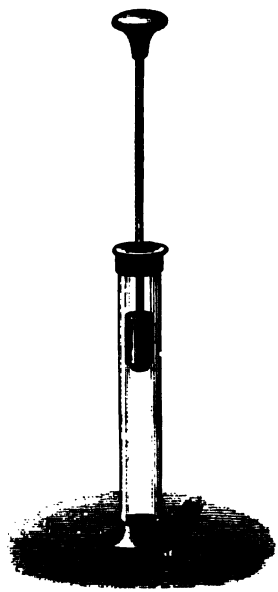


Fig. 143.

Élasticité et compressibilité des gaz. — Briquet à air. — Les gaz sont parfaitement élastiques, au même degré que les liquides; mais ils sont incomparablement plus compressibles que ceux-ci. Ces deux propriétés des gaz peuvent être mises en évidence à l'aide d'une même expérience, celle du *briquet atmosphérique* ou *briquet à air*. Elle consiste à enfoncer un piston de cuir dans un récipient de verre, en forme d'éprouvette à pied, où il peut pénétrer à frottement doux (fig. 143). La petite masse d'air qui y est contenue se comprime à mesure que le piston avance, et se réduit à un volume aussi petit que l'on veut, — ce qui prouve sa grande compressibilité; — mais elle se détend dès qu'on cesse de pousser le piston et repousse celui-ci jusqu'à l'orifice du récipient, — ce qui prouve sa grande élasticité.

Lorsqu'on opère très brusquement, la compression du gaz est

1. L'une ou l'autre de ces expériences donne approximativement 1,3 g pour le poids d'un litre d'air, pris dans les conditions ordinaires.

accompagnée d'un dégagement de chaleur, qui peut aller jusqu'à l'inflammation d'un morceau d'amadou placé au fond de l'éprouvette : de là le nom de *briquet à air* donné à ce petit appareil.

Expansibilité des gaz. — Force élastique. — Les gaz sont éminemment *expansibles*, c'est-à-dire qu'ils tendent toujours à prendre un volume plus grand et à occuper tout l'espace qui leur est ouvert. L'*expansibilité* est leur propriété la plus caractéristique; elle se démontre par l'expérience suivante.

On place sous le récipient de la machine pneumatique une vessie, munie d'un robinet, qui a été aplatie sous la main et ne

Fig. 144.

contient plus qu'une faible quantité d'air ou d'un gaz quelconque (fig. 144, I). On a eu aussi la précaution d'en mouiller les parois, afin de les rendre plus flexibles. Il y a d'abord équilibre entre la pression de l'air du récipient et la force d'expansion de l'air renfermé dans la vessie; mais, dès que l'on fait le vide, la pression extérieure s'affaiblit, et la vessie se gonfle de plus en plus, comme si l'on soufflait dedans (fig. 144, II) : ce qui prouve l'expansibilité du gaz qu'elle contient. Lorsqu'on fait ensuite rentrer l'air extérieur dans la cloche, on voit la vessie, comprimée par le gaz rentrant, reprendre son volume primitif : ce qui est une nouvelle preuve de l'élasticité des gaz.

très sensible un ballon de verre de 3 à 4 litres, dont le col est muni d'un bon robinet. On tare d'abord ce ballon plein d'air; puis on y fait le vide : on constate alors que l'équilibre est détruit. Pour le rétablir, il faut ajouter du côté du ballon quelques grammes, qui représentent évidemment le poids de l'air extrait.

On peut opérer autrement. On commence par faire le vide dans le ballon, puis on tare le ballon vide, en ayant soin de mettre préalablement quelques grammes dans le plateau, du même côté. On ouvre alors le robinet; l'air rentre dans le ballon avec un sifflement caractéristique et le fléau s'incline de ce côté. On rétablit l'équilibre en enlevant un certain nombre de grammes, qui représentent évidemment le poids de l'air rentré[1].

Fig. 145.

Élasticité et compressibilité des gaz. — Briquet à air. — Les gaz sont parfaitement élastiques, au même degré que les liquides; mais ils sont incomparablement plus compressibles que ceux-ci. Ces deux propriétés des gaz peuvent être mises en évidence à l'aide d'une même expérience, celle du *briquet atmosphérique* ou *briquet à air*. Elle consiste à enfoncer un piston de cuir dans un récipient de verre, en forme d'éprouvette à pied, où il peut pénétrer à frottement doux (fig. 145). La petite masse d'air qui y est contenue se comprime à mesure que le piston avance, et se réduit à un volume aussi petit que l'on veut, — ce qui prouve sa grande compressibilité; — mais elle se détend dès qu'on cesse de pousser le piston et repousse celui-ci jusqu'à l'orifice du récipient, — ce qui prouve sa grande élasticité.

Lorsqu'on opère très brusquement, la compression du gaz est

1. *L'une ou l'autre de ces* expériences donne approximativement 1,3 g pour *le poids d'un litre d'air*, pris dans les conditions ordinaires.

accompagnée d'un dégagement de chaleur, qui peut aller jusqu'à l'inflammation d'un morceau d'amadou placé au fond de l'éprouvette : de là le nom de *briquet à air* donné à ce petit appareil.

Expansibilité des gaz. — Force élastique. — Les gaz sont éminemment *expansibles*, c'est-à-dire qu'ils tendent toujours à prendre un volume plus grand et à occuper tout l'espace qui leur est ouvert. L'*expansibilité* est leur propriété la plus caractéristique; elle se démontre par l'expérience suivante.

On place sous le récipient de la machine pneumatique une vessie, munie d'un robinet, qui a été aplatie sous la main et ne

Fig. 144.

contient plus qu'une faible quantité d'air ou d'un gaz quelconque (fig. 144, I). On a eu aussi la précaution d'en mouiller les parois, afin de les rendre plus flexibles. Il y a d'abord équilibre entre la pression de l'air du récipient et la force d'expansion de l'air renfermé dans la vessie; mais, dès que l'on fait le vide, la pression extérieure s'affaiblit, et la vessie se gonfle de plus en plus, comme si l'on soufflait dedans (fig. 144, II) : ce qui prouve l'expansibilité du gaz qu'elle contient. Lorsqu'on fait ensuite rentrer l'air extérieur dans la cloche, on voit la vessie, comprimée par le gaz rentrant, *reprendre son volume primitif* : ce qui est une nou*velle preuve de l'élasticité des gaz.*

La distension de la vessie par le gaz qui se détend met en évidence une force moléculaire qui résulte de l'expansibilité des gaz : c'est ce qu'on appelle leur *force élastique*.

Objet de la Pneumatique. — L'étude de ces diverses propriétés des gaz, la manifestation expérimentale des phénomènes qui en résultent et la détermination des lois qui régissent ces phénomènes constituent la partie de la physique que l'on appelle *la Pneumatique*.

141. **Statique des gaz.** — Quelques-uns des principes de l'hydrostatique peuvent être étendus au cas des gaz pesants : ils constituent une *Statique* des gaz.

1° *Principe de Pascal appliqué aux gaz.* — Étant donnée une masse gazeuse en équilibre dans un récipient fermé, si l'on fait abstraction de son poids et de sa force élastique, le principe d'*égalité de pression* s'y applique rigoureusement. On peut l'énoncer de la même manière que dans le cas des liquides (96).

2° *Conditions d'équilibre des gaz pesants.* — On pourrait démontrer *à priori*, pour les gaz comme pour les liquides pesants, le théorème fondamental sur *la différence des pressions en deux points de la masse situés à des niveaux différents* (102). Les conditions d'équilibre des gaz pesants (du moins celles qui leur sont applicables) se déduisent rigoureusement de ce théorème fondamental et on peut les énoncer de la même manière que pour les liquides (104).

Remarque. — *Cas de deux ou plusieurs gaz.* — Les conditions générales (1°) et (2°) s'appliquent seules ; car il ne peut y avoir, à cause de l'expansibilité des gaz, ni surfaces libres, ni surfaces de séparation, ni superposition par ordre de densités. Il se produit, dans ce cas, un mélange intime des gaz hétérogènes, ainsi qu'une égalisation de force élastique, qui constituent le phénomène de la *diffusion des gaz*.

3° *Pressions dans les gaz pesants en équilibre. — Pression atmosphérique.* — Dans une masse gazeuse contenue en vase clos, les pressions, qu'on peut appeler statiques et qui résultent de la pesanteur, sont négligeables par rapport à sa force élastique, qui est égale à la pression extérieure. Les différences de pression résultant de la différence des niveaux ne se manifesteraient nettement que dans le cas d'un récipient de dimensions considérables. C'est précisément le cas de l'atmosphère terrestre, au sein de laquelle nous vivons comme au fond d'un immense océan fluide. La pression et la force élastique de l'air y sont *sensiblement constantes* en tous les points d'un même plan *horizontal* (*en un même lieu du globe*) et varient, dans un

même lieu, en sens inverse de l'altitude : c'est cette pression qu'on appelle *pression atmosphérique*.

142. Étude de la pression atmosphérique. — 1° *Définitions.* — On donne le nom d'*atmosphère*[1] à la couche d'air qui enveloppe de toutes parts le sphéroïde terrestre et qui est emportée avec lui dans son double mouvement dans l'espace.

Les évaluations approximatives de la hauteur de l'atmosphère, faites par différentes méthodes, ont conduit à des résultats très différents. Les nombres varient depuis 70 kilomètres jusqu'à 540 kilomètres. En s'en tenant à la limite minimum, on voit que la profondeur moyenne de cet océan fluide est plus de dix fois plus grande que celle des mers les plus profondes. Aussi, malgré la faible densité de l'air, le poids total de l'atmosphère est-il à peu près égal à celui de 581 000 cubes en cuivre de 1 kilomètre de côté.

2° *Démonstration expérimentale de son existence.* — On conçoit donc que l'atmosphère doive exercer à la surface du globe une pression considérable. On en démontre ordinairement l'existence par les expériences suivantes.

Expérience du crève-vessie. — Le *crève-vessie* consiste en un manchon de verre fermé hermétiquement, à sa partie supérieure, par une membrane de baudruche ou de vessie. L'autre extrémité, dont les bords sont bien dressés et graissés de suif, s'applique sur la platine d'une machine à faire le vide ou machine pneumatique (fig. 145). Dès qu'on commence à faire le vide, la membrane se déprime sous la pression atmosphérique qu'elle supporte, et bientôt elle crève avec une vive détonation, due à la rentrée subite de l'air.

Fig. 145.

Expérience des hémisphères de Magdebourg. — Ce petit appareil classique[2] consiste en deux hémisphères creux, de laiton, ayant de 10 à 12 centimètres de diamètre (fig. 146, I). Leurs bords sont garnis d'une rondelle annulaire de cuir, enduite de suif, qui rend

1. De ἀτμός, *vapeur*, et σφαῖρα, *sphère*.
2. Il est dû à Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg.

la fermeture hermétique lorsque ces bords sont en contact. L'un des hémisphères porte un robinet qui se visse sur la machine pneumatique, et l'autre un anneau qui sert de poignée pour le saisir et le tirer. Tant que les hémisphères contiennent de l'air, on les sépare sans difficulté, car il y a équilibre entre la force

Fig. 146.

élastique de l'air intérieur et la pression de l'atmosphère; mais, une fois que le vide est fait, on ne peut plus les séparer sans un puissant effort, dans quelque position qu'on les tienne (fig. 146, II). Cela prouve, en outre, que la pression atmosphérique s'exerce en tous sens.

143. **Mesure de la pression atmosphérique : expérience de Torricelli.** — L'expérience suivante, faite pour la première fois en 1643 par Torricelli, élève de Galilée, mesure en outre la pression atmosphérique.

Expérience. — On prend un tube de verre long de 80 centimètres au moins, d'un diamètre intérieur de 6 à 7 millimètres, et fermé à l'une de ses extrémités. On le pose verticalement (fig. 147, I), et on le remplit entièrement de mercure; puis, fermant l'ouverture C avec le pouce, on le retourne et on en plonge l'extrémité

verte dans une cuvette à mercure (fig. 147, II). On retire alors doigt et l'on voit la colonne mercurielle baisser aussitôt jusqu'à hauteur AB, d'environ 76 centimètres, où elle se maintient. héorie. — Torricelli eut le mérite de donner tout de suite ritable explication de ce curieux phénomène. Il affirma, et soutint contre de nombreux contradicteurs, que c'est la pression atmosphérique qui soulève le mercure dans le tube et qui lui fait équilibre. Cette théorie n'est plus contestée aujourd'hui : elle est une conséquence nécessaire des principes de l'hydrostatique.

En effet, le tube et la cuvette forment un système de

Fig. 147.

Fig. 148.

eux vases communicants qui contiennent un liquide pesant en quilibre. La pression doit donc y être la même en tous les points 'une tranche horizontale quelconque. Considérons, en particuer, deux éléments de surface, *b'* et *b*, égaux à la section du ube, et pris sur le plan de la surface libre du mercure dans la uvette, l'un à l'intérieur du tube et l'autre à l'extérieur (fig. 148). ur l'élément *b'* *c'est la pression atmosphérique* qui s'exerce *irectement, tandis que sur l'élément b* c'est le poids de

colonne mercurielle. On peut donc en conclure, avec Torricelli, que la pression atmosphérique équivaut, à surface égale, au poids d'une colonne de mercure d'environ 76 centimètres de hauteur.

144. **Vérifications de Pascal.** — 1° *Expérience du Puy de Dôme.* — Il résulte de cette explication que, *si le poids de l'atmosphère augmente ou diminue, cela doit faire monter ou baisser en même temps la colonne de mercure.* Le seul moyen de diminuer, pour ainsi dire à volonté, la pression que l'atmosphère exerce sur les corps, consiste à les transporter à des altitudes plus ou moins élevées. C'est pourquoi Pascal pria son beau-frère Périer, qui habitait l'Auvergne, de répéter sur le Puy de Dôme l'expérience de Torricelli. Périer fit l'expérience successivement au pied et au sommet de la montagne, le même jour, et il constata que la colonne de mercure soulevée diminuait, conformément aux prévisions de Pascal, d'environ 8 centimètres.

2° *Expérience de Rouen.* — Pascal prévit cette deuxième conséquence : *si c'est la pression atmosphérique qui soutient une colonne mercurielle d'une certaine hauteur dans le tube de Torricelli, elle y soutiendra de même une colonne plus haute d'un liquide moins dense.* Il la vérifia lui-même à Rouen, en 1646, en répétant l'expérience de Torricelli avec du vin rouge au lieu de mercure. Il prit un tube de 15 mètres de long, fermé à un bout ; il le remplit de vin rouge et le dressa verticalement dans un réservoir plein du même liquide. Alors il observa que le liquide s'arrêtait dans le tube à une hauteur d'*environ* 10,40 m, c'est-à-dire *environ* 13,6 fois plus grande que le mercure ; or, le vin rouge étant 13,6 fois *environ* moins dense que ce liquide, le poids de la colonne de vin était bien égal à celui de la colonne de mercure de Torricelli.

145. **Valeur de la pression atmosphérique en kilogrammes.** — La hauteur à laquelle le mercure demeure en équilibre dans le tube de Torricelli fournit le moyen d'évaluer en kilogrammes la pression de l'atmosphère sur une surface donnée. Supposons, par exemple, que la colonne ait 76 centimètres et que la section intérieure du tube soit de 1 centimètre carré. La pression que l'atmosphère exerce sur 1 centimètre carré, pris en un point quelconque de la surface libre du mercure dans la cuvette, est égale au poids d'un cylindre de mercure ayant 1 centimètre carré de base et 76 centimètres de hauteur, et par suite un volume de 76 centimètres cubes[1]. Or, 1 centimètre cube d'eau

1. *C'est ce que signifie* l'expression abrégée : La pression *atmosphérique moyenne est de 76 centimètres de mercure.*

pesant environ 1 gramme, 1 centimètre cube de mercure doit peser 13,6 g, d'où l'on conclut que le poids de la colonne équivaut à 13,6 × 76, c'est-à-dire 1033 grammes. Telle est la valeur de la pression atmosphérique sur 1 centimètre carré.

Pression atmosphérique en unités C. G. S. — *Atmosphère C. G. S.* — Ce poids de 1033 grammes par centimètre carré ferait, en dynes, $1033 \times 981 = 1{,}0136 \times 10^6$, c'est-à-dire un peu plus d'une *mégadyne*. On voit donc que le poids d'*une mégadyne* est très voisin de l't[illegible] tmosphérique.

On appelle *unité de pressio*[illegible], ou bien *atmosphère C. G. S.*, la pression qu'exerc[illegible] un [illegible] de 1 mégadyne par centimètre carré. Cette pression correspo[illegible]ent, *à Paris*, à une hauteur barométrique de 74,978 cm.

146. **Classification des baromètres.** — On nomme *baromètres*[1] des instruments propres à mesurer la pression atmosphérique. Le type des baromètres est le *baromètre à cuvette*, qui n'est autre chose qu'un tube de Torricelli fixé dans une cuvette de mercure. Tous les bons baromètres sont des perfectionnements de celui-ci : ce sont des *baromètres à mercure*. Tels sont : le *baromètre ordinaire* ou *baromètre à cuvette*, le *baromètre de Fortin*, le *baromètre à siphon* ou *baromètre de Gay-Lussac*, le *baromètre normal* ou *baromètre de Regnault*, le *baromètre statique* ou *baromètre à poids* ou *barographe*, qui sert non seulement à mesurer, mais à enregistrer les variations de la pression atmosphérique dans un lieu donné.

On construit aussi des baromètres sans mercure, appelés *baromètres anéroïdes*[2] ou *baromètres métalliques*, à cause de leur mode de construction. Nous décrirons le *baromètre de Vidi* et le *baromètre de Bourdon*.

147. **Baromètre à cuvette.** — Tout *baromètre à cuvette* se compose d'un tube de Torricelli rempli de mercure, plongeant dans une cuvette pleine de ce liquide et muni d'une échelle graduée en millimètres, qui permet de mesurer aisément la hauteur de la colonne soulevée. Cette graduation est tracée sur le tube même ou bien appliquée le long de sa surface, de manière que le zéro corresponde au niveau du mercure dans la cuvette.

Cet instrument si simple a un grave défaut : le niveau dans la cuvette n'est pas fixe, parce que, la pression atmosphérique augmentant ou diminuant, une certaine quantité de mercure passe de la cuvette dans le tube, ou inversement. Or, le zéro de l'échelle étant fixe, la lecture du niveau dans le tube n'indiquera

1. De βάρος, *poids*, et μέτρον, *mesure*.
2. De ἀ *privatif* et νηρός, *humide, mouillé*.

pas, en général, la véritable hauteur barométrique. Afin de prévenir ou de corriger l'erreur de lecture, on a dû imaginer divers dispositifs qui compliquent plus ou moins le baromètre primitif de Torricelli.

Quel qu'il soit d'ailleurs, on prend toujours comme *hauteur barométrique* la *distance verticale* du niveau dans la cuvette au niveau dans le tube. C'est pourquoi le baromètre doit toujours être parfaitement vertical quand on fait la lecture barométrique; sinon, le tube étant incliné, la colonne de mercure s'allongerait et on lirait sur l'échelle (fig. 149) un nombre trop grand.

Fig. 149.

148. Baromètre à niveau invariable. — L'erreur due aux variations du niveau dans la cuvette serait évidemment d'autant plus

Fig. 150.

faible que la section de la cuvette serait plus *grande*. Mais on ne peut agrandir celle-ci indéfiniment, à cause du poids énorme de mercure qu'il faudrait employer. Aussi se sert-on quelquefois d'une cuvette, dite *à niveau invariable*, qui, tout en contenant peu de mercure, offre une grande surface.

Description. — La cuvette (fig. 150, coupe et projection) est divisée en deux *compartiments* : l'un, sphérique, est rempli de mercure dans lequel plonge *l'extrémité du tube barométrique*; l'autre, cylindrique et à grand diamètre, *permet à la surface libre* du mercure de s'étaler plus ou moins sur la paroi m.

La quantité totale du mercure est telle, que, malgré les variations de la pression, elle n'atteigne jamais la paroi latérale de la cuvette *nn*, et ne rentre jamais totalement dans le réservoir sphérique. Alors, si la pression diminue, un peu de mercure passe du tube dans la cuvette, mais le liquide ne fait que s'étaler davantage, par exemple de *m* en *n*, tout en conservant sensiblement le même niveau. Il en est encore de même lorsqu'une petite quantité de mercure passe de la cuvette dans le tube. Néanmoins l'on n'obtient pas ainsi un niveau *rigoureusement* invariable.

149. Baromètre de Fortin. — 1° *Principe et description.* — L'organe caractéristique de cet instrument est une cuvette à *fond mobile*, imaginée par le constructeur Fortin. C'est un cylindre en verre, dont le fond *mn* est formé d'une peau de chamois, qu'on peut élever ou abaisser au moyen d'une vis de rappel C placée en dessous (fig. 151).

Grâce à ce dispositif, on peut obtenir un niveau constant dans la cuvette, en faisant affleurer à volonté la surface libre *b* du mercure à un point de repère fixe *a*. On peut, en outre, rendre l'instrument portatif : pour cela, on soulève la peau de chamois, et le mercure avec elle, jusqu'à ce que le tube et la cuvette en soient complètement remplis; le mercure et son enveloppe ne forment plus qu'un seul bloc; on peut alors incliner ou même renverser l'instrument sans qu'il puisse y rentrer de l'air ou que le choc du mercure risque d'en briser le verre.

Fig. 151.

Détails de construction. — Le tube E est étroit (diam. : 5 mm) et la cuvette de petites dimensions (diam. : 5 cm; h^r : 5 cm) (fig. 151); elle est fermée à sa partie supérieure par un disque de buis, fixé au-dessous d'un couvercle de cuivre M et traversé par la pointe d'ivoire *a*, qui sert de repère. Le tube E va plonger, par une pointe effilée, dans le mercure de la cuvette. Celle-ci et le tube sont reliés ensemble au moyen de la peau de chamois *ce*, que deux fortes ligatures fixent, d'une part en *c*, à un étranglement du tube, d'autre part en *e*, à une tubulure de cuivre fixée au centre du couvercle. Cette fermeture peut *empêcher la sortie du mercure*, mais elle ne s'oppose pas *à l'action de la pression atmosphérique*.

A sa partie inférieure, le cylindre de verre *b* est mastiqué sur un cylindre de buis *zz*, et c'est sur le pourtour de celui-ci, en *ii*, qu'est fortement fixée, à l'aide d'une ligature, la peau de chamois *mn*. A son centre, cette peau vient s'attacher à un bouton de buis *x*, lequel repose sur l'extrémité d'une vis C. Lorsqu'on tourne celle-ci dans un sens ou dans l'autre, le bouton monte ou descend, et avec lui le fond *mn*.

Un étui de laiton G enveloppe toute la partie inférieure de la cuvette et trois boulons à vis, *k*, *k*, *k*, le relient au couvercle M. De même, le tube barométrique est renfermé dans un étui de cuivre destiné à le protéger (fig. 152). Cet étui présente à sa partie supérieure deux fenêtres longitudinales, opposées l'une à l'autre, qui permettent de voir le niveau du mercure en A et dont les bords supérieurs définissent un plan horizontal. L'une d'elles porte, gravées sur une arête, les divisions en millimètres de l'échelle, qui a son zéro au niveau constant marqué par la pointe *a* de la cuvette. On peut apprécier le dixième ou le vingtième de millimètre à l'aide d'un vernier (au dixième ou au vingtième) qui est porté par un curseur AB (fig. 153). On fait monter ou descendre le curseur à l'aide d'un pignon B qui engrène avec une crémaillère taillée sur l'autre bord de la fenêtre graduée.

Fig. 152.

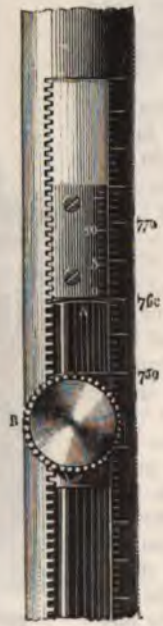


Fig. 153.

3° *Lecture du baromètre.* — On commence par installer le baromètre verticalement. On agit ensuite sur la vis C de manière à soulever le fond de la cuvette, jusqu'à ce que la surface libre du mercure vienne en contact avec la pointe d'ivoire *a* (fig. 151). Comme la surface métallique fait office de miroir plan, le contact est réalisé *à l'instant où la pointe et son image se touchent*. Si l'on dépasse l'affleurement, on s'en aperçoit immédiatement à un autre phénomène de réflexion : la pointe, étant un peu *mouillée, et n'étant pas* mouillée par le mercure, déprime le liquide autour *d'elle, et on la voit entourée d'une auréole* lumineuse. On fait alors redescendre *le niveau mercuriel*, jusqu'à ce que cette auréole ait disparu.

On lit la hauteur du mercure à l'aide du curseur. On amène le plan horizontal des fenêtres à être tangent à la surface convexe du niveau mercuriel : ce contact est réalisé quand un rayon visuel, mené tangentiellement aux deux bords de ces fenêtres, rase en même temps le ménisque de la colonne. Supposons que le vernier du curseur soit un vernier au dixième. Le trait 0 coïncidant toujours avec le plan horizontal des bords supérieurs se trouve alors amené dans le plan horizontal du niveau. On n'aura donc qu'à lire sur l'échelle du plan barométrique le nombre entier de millimètres N, situé immédiatement au-dessous du trait 0 du vernier, puis à chercher quelle est la division n du vernier qui coïncide avec une division de l'échelle. On aura alors la longueur h de la colonne barométrique, à *un dixième de millimètre près*.

4° *Erreurs.* — Il y a d'abord des erreurs communes à tous les baromètres. Nous verrons plus loin la manière de les corriger. La température est indiquée par un petit thermomètre (fig. 152) dont le réservoir est profondément enfoncé dans la gaine.

Il y a une autre cause d'erreur qui est particulière au baromètre de Fortin : c'est le défaut de coïncidence qui peut exister entre le zéro de l'échelle et l'extrémité de la pointe d'ivoire. S'il y avait coïncidence parfaite, la distance entre la pointe et un trait quelconque n de l'échelle, étant mesurée au cathétomètre, serait trouvée égale à n millimètres. Sinon on trouvera $n \pm \varepsilon$: cette quantité ε représente l'écart qui existe ; on devra en corriger toutes les mesures ultérieures.

5° *Usages du baromètre de Fortin.* — Le baromètre de Fortin peut servir aussi bien comme baromètre fixe, dans les laboratoires, que comme baromètre de voyage.

I. *Baromètre fixe.* — Dans le premier cas, on commence par l'installer le long d'un mur ou d'une planchette solide, bien verticale. Ce support est muni en haut d'un crochet, où l'on enfile un petit anneau, qui est placé au sommet de la gaine, et au bas un large anneau métallique, dans lequel passe librement le réservoir. Le baromètre ayant pris de lui-même la position verticale, on le saisit et on le fixe dans cette position à l'aide de trois vis de pression qui traversent l'anneau.

II. *Baromètre de voyage.* — *Suspension à la Cardan.* — On l'installe verticalement à l'aide d'un support particulier appelé suspension *à la Cardan*, du nom de son inventeur.

Fig. 154.

L'étui métallique du tube est fixé par deux vis de pression a et b (fig. 154) à un manchon de cuivre X. Celui-ci porte deux tourillons o, o (dont un seul est visible dans la figure), lesquels tournent librement dans deux trous pratiqués dans un collier Y. Enfin ce dernier porte lui-même, dans une direction perpendiculaire à celle des tourillons o, o, deux tourillons semblables, m et n, portés par *un support Z. Par cette double* suspension, le baromètre peut *osciller librement dans deux directions rectangulaires* autour des axes o o et

mn, et il prend de lui-même une position d'équilibre dans laquelle son axe de figure est parfaitement vertical.

Remarque. — La suspension est souvent portée par un trépied en bois, dont les trois branches articulées sont évidées et forment, par leur réunion, une espèce de canne creuse qui sert d'étui pour serrer le baromètre et pour le transporter.

150. Baromètres à siphon. — 1° *Principe.* — Un *baromètre à siphon* consiste essentiellement en un tube de verre *abc* (fig. 155), recourbé en deux branches inégales; la plus petite est ouverte, et la plus grande, qui est fermée à son sommet, est remplie de mercure comme le tube d'un baromètre à cuvette : la hauteur barométrique est mesurée par *la distance verticale des niveaux dans les deux branches.*

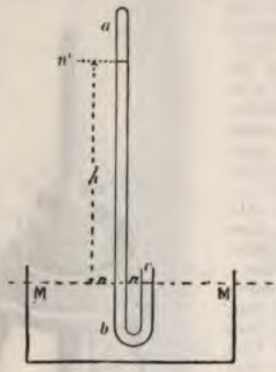


Fig. 155.

Fig. 156.

En effet, soit *n* le niveau dans la petite branche *bc*, et *n'* le niveau dans la grande branche. Le liquide étant en équilibre, la pression doit y être la même en tous les points d'un même plan horizontal, par exemple sur le plan du niveau inférieur. Or, en *n*, dans la petite branche, c'est la pression atmosphérique qui s'exerce directement, et en *n*, dans la grande branche, c'est le poids de la colonne mercurielle *nn'* : donc la hauteur de cette colonne est

précisément la hauteur barométrique; et l'on voit qu'elle est égale à la distance verticale des deux niveaux *n*, *n'*.

2° *Baromètre de Gay-Lussac.* — Cette forme de baromètre est très ancienne; Pascal s'en servait déjà; Gay-Lussac y a attaché son nom (fig. 156) en apportant de notables perfectionnements à sa construction.

Description. — Il prenait pour les deux branches deux portions d'un même tube bien cylindrique et il les réunissait par un tube capillaire (157, I). La courte branche est fermée à son extrémité supérieure comme la grande branche, de manière à empêcher l'entrée des poussières de l'air qui saliraient le mercure. Un petit trou conique *i* (fig. 158), pratiqué latéralement à l'aide d'une aiguille chauffée au rouge, suffit pour la pénétration de l'air et pour la transmission de la pression atmosphérique.

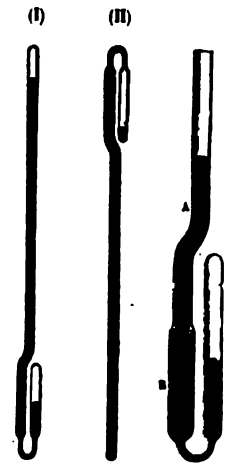


Fig 157. Fig. 158.

La hauteur barométrique se mesure au moyen de deux échelles ayant leur zéro commun en O (fig. 156), vers le milieu de la grande branche, et graduées en sens contraires, sur deux règles de cuivre parallèles au tube barométrique. Deux curseurs à vernier, *m* et *n*, peuvent glisser sur les échelles, de manière à permettre l'évaluation *au dixième de millimètre*. La somme des deux nombres donne la hauteur AB.

Usages. — Le baromètre de Gay-Lussac peut servir soit de baromètre fixe, soit de baromètre de voyage. Dans le premier cas, on le fixe sur une planchette (fig. 156). Pour l'emporter en voyage, on commence par le retourner (fig. 157, II) : la grande branche se remplit alors de mercure, la jonction capillaire ne se vide pas et l'excès de liquide tombe au fond de la petite branche. Ainsi renversé, le siphon peut être transporté sans danger de rupture, dans un étui de cuivre analogue à celui de Fortin. Pour que cet étui eût moins de largeur, Gay-Lussac avait soin de courber la branche capillaire de manière à ramener la petite branche dans le prolongement de la grande branche.

Perfectionnement de Bunten. — Pour se servir du baromètre il faut donc le redresser *et le suspendre. Afin* de prévenir toute *rentrée d'air, le constructeur Bunten imagina* de souder (fig. 158)

le tube capillaire directement à un tube B, d'un fort diamètre, dans lequel la grande branche vient aboutir en pointe effilée. Grâce à ce dispositif, s'il passe des bulles d'air dans le tube capillaire pendant le retournement, elles viennent se loger à la partie la plus élevée du renflement, au lieu de monter jusqu'à la chambre barométrique.

Fig. 159.

151. **Baromètre normal.** — Pour les observations de précision dans les laboratoires on emploie un baromètre à cuvette décrit par Regnault sous le nom de *baromètre normal*[1].

La cuvette est une auge de fonte parallélépipédique (fig. 159), qui est solidement fixée sur une planche épaisse scellée dans le mur. Un tube, de 2,5 à 3 centimètres de diamètre, assez large pour supprimer la dépression capillaire, et de 1 mètre de hauteur, plonge dans le mercure de la cuvette; il est fixé contre la planche d'appui par des tasseaux, de manière à être maintenu vertical.

Bien que la section de la cuvette soit assez grande par rapport à celle du tube pour que les variations de niveau y soient très petites, on en supprime absolument les inconvénients à l'aide d'un dispositif spécial. A l'une des parois latérales de la cuvette est adaptée une pièce qui porte un écrou *e*. Dans celui-ci passe une vis à deux pointes, dont la longueur a été relevée au cathétomètre. Avant chaque mesure, on amène la pointe inférieure à coïncider, comme dans le baromètre de Fortin, avec le niveau du mercure dans la cuvette. On n'a plus qu'à évaluer au cathétomètre la distance verticale de la pointe *a* de la vis au niveau *b* du mercure dans le tube, puis à ajouter à cette distance la longueur de la vis : on a ainsi la hauteur barométrique avec une grande précision.

Dispositif de M. A. Leduc. — M. Leduc a ajouté au baromètre de Regnault un dispositif qui augmente la précision des mesures tout en les simplifiant.

Il place, à cheval sur le bord de la cuvette, un tube en S (fig. 186) dont la partie large a exactement le même diamètre que le tube barométrique, *avec lequel il* constitue, par l'intermédiaire de la cuvette, un système de vases

1. *On l'appelle aussi quelquefois baromètre de* Regnault.

communicants, remplis du même liquide. La pression barométrique est mesurée par la différence des niveaux dans les deux tubes, exactement comme dans le baromètre à siphon. Il suffit de deux lectures au cathétomètre.

Il n'y a pas à s'occuper de la correction capillaire. En effet, étant donnée la largeur des tubes, elle s'élèverait à 0,05 mm environ de part et d'autre ; la différence, si elle existe, est donc tout à fait négligeable. Car il ne faut pas oublier que la pression atmosphérique varie souvent de plusieurs centièmes de millimètre pendant la durée d'une expérience. Il serait donc illusoire de chercher dans les mesures une précision supérieure au centième de millimètre.

Quant à l'erreur de température, on la corrige comme d'habitude.

152. **Baromètres du Bureau international des poids et mesures.** — On emploie au Bureau international établi à Sèvres des baromètres à siphon dont les

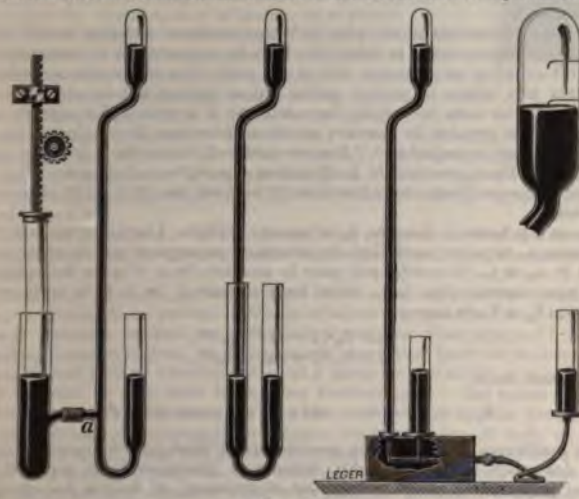


Fig. 160.

tubes extrêmes sont alignés dans une même verticale (fig. 160). Les relevés de hauteurs s'effectuent au moyen du comparateur. Les ménisques sont établis dans des tubes d'environ 25 millimètres de diamètre et par *voie ascendante*, afin d'éviter les ménisques creux qui se produisent souvent lorsque le baromètre baisse.

On atteint ce but soit en plongeant un piston de verre dans un réservoir latéral placé au niveau de la branche ouverte (*baromètre à piston plongeur* de M. Amagat), soit en abaissant le tube barométrique dans l'une des branches d'une cuvette fixe en forme d'U (*baromètre à tube mobile*), soit enfin en élevant une éprouvette en communication avec la petite branche du baromètre et contenant du mercure (*baromètre à réserve auxiliaire*). Les organes mobiles sont portés sur des chariots.

On prend comme extrémité de la hauteur barométrique le milieu de la distance qui sépare une fine pointe en verre noir, recourbée vers le ménisque en regard de la partie centrale, de *l'image de la pointe* donnée par cette région du ménisque *qui est plane (Pariett)*. On peut substituer à la pointe l'image réelle

d'un fil (Marek) ou pointer directement sur un trait, et son image, d'une règle placée derrière le baromètre (Thiesen).

Trois ou quatre thermomètres dont les réservoirs sont plongés dans le mercure permettent d'effectuer les corrections de température; d'autre part, la courbe des ménisques est assez grande pour qu'il soit possible d'apprécier l'erreur due à la force élastique de l'air dans la chambre barométrique s'il y a lieu.

153. **Corrections barométriques.** — La hauteur barométrique, mesurée au moyen des instruments et des méthodes de précision, doit encore être réduite à certaines conditions normales adoptées par tous les savants. On fait donc subir, au nombre brut donné par l'expérience, un certain nombre de corrections, que nous allons exposer d'après les règles suivies au Bureau international des poids et mesures[1].

Il y a des *corrections principales*, qu'il faut appliquer à chaque lecture et qui constituent souvent toute la réduction. Elles se rapportent à la température et à l'accélération de la pesanteur. Il y a, en outre, des *corrections secondaires*, toujours très faibles et parfois nulles, qui se rapportent à la capillarité, à la pression de l'air dans la chambre barométrique, à la tension des vapeurs mercurielles, à la pression du mercure sur lui-même et aux forces électriques.

I. *Corrections principales.* — 1° *Température.* — L'erreur due à la température est double; l'une provient de la dilatation des règles métalliques : c'est une *erreur en moins*; l'autre de la dilatation du mercure lui-même : c'est une *erreur en plus*.

Soient h la hauteur observée, h_0 la hauteur corrigée, t la température de l'expérience, α_r et β_r les coefficients de dilatation qui servent pour la règle, entre 0° et t°, α_m et β_m les coefficients pour le mercure. On a, d'après des équations que nous verrons plus loin, entre les longueurs l_0 et l_t de la règle et les volumes V_0 et V_t du mercure :

$$l_t = l_0\,(1 + \alpha_r t + \beta_r t^2),$$
$$V_t = V_0\,(1 + \alpha_m t + \beta_m t^2).$$

On déduit de là

$$h_0 = h\,[1 - (\alpha_m - \alpha_r)\,t + (\alpha^2_m - \beta_m + \beta_r)\,t^2].$$

Les meilleures données qu'on possède sur la dilatation du mercure résultent des expériences de Regnault. Quant à la dilatation de la règle, il faut autant que possible la déterminer soit directement, au moyen des comparateurs, soit sur un échantillon du même métal.

2° *Pesanteur.* — On est convenu de réduire toutes les observations où g intervient à ce qu'elles seraient si ce coefficient avait une valeur constante, celle qu'il possède à la latitude de 45° et au niveau de la mer.

M. Broch, en complétant une formule de Laplace et en tenant compte d'un grand nombre d'observations, a proposé la formule de correction

$$\frac{G_{\varphi,m}}{G_{45°0}} = (1 - 0{,}00259 \cos 2\varphi)\,(1 - 0{,}000000196\,M),$$

$G_{\varphi,m}$ étant la valeur de l'accélération sous la latitude φ° et à l'altitude M mètres et $G_{45°0}$ le nombre corrigé. Cette correction est, à Paris, pour la pression normale, d'environ + 0,25 mm.

II. *Corrections secondaires.* — 1° *Capillarité.* — Nous avons vu comment on élimine l'effet des forces capillaires dans les baromètres de précision. Dans les

1. Voir le *Traité pratique de la Thermométrie de précision*, par M. Ch.-Ed. *Guillaume, attaché au* Bureau international des poids et mesures.

autres (Fortin, Gay-Lussac, etc.), les erreurs capillaires sont assez sensibles, et il convient de les corriger.

On démontre (265) que cette dépression capillaire dépend à la fois du diamètre du tube et de la *flèche* du ménisque. On appelle ainsi la hauteur *od* (fig. 161) de la surface convexe du mercure au-dessus de la section horizontale *ab* qui sert de base au ménisque.

Fig. 161.

Mesure de la flèche. — Pour un même tube, la longueur de la flèche n'est pas constante : elle varie selon que le ménisque est formé par un mouvement ascendant ou un mouvement descendant. On la mesure en faisant affleurer le bord supérieur du curseur successivement à la base du ménisque, puis au sommet. En lisant sur l'échelle le déplacement du curseur, on a la hauteur de la flèche.

Mesure du diamètre. — Le diamètre intérieur des tubes se détermine en les pesant successivement vides et pleins de mercure. La différence des poids donne le poids du cylindre de mercure contenu dans les tubes. La hauteur *h* de ce cylindre étant facile à mesurer, le volume et par suite la section se déduit de la formule $P = ShD$. Ce procédé ne peut d'ailleurs s'appliquer qu'à des tubes *bien calibrés*, c'est-à-dire parfaitement cylindriques. Ordinairement le constructeur joint à l'instrument un morceau du tube qui a servi à le construire. C'est à ce bout de tube qu'on applique aisément le procédé.

Tables de correction. — A l'aide de ces deux données, on trouve la valeur de la dépression dans des tables à double entrée, calculées d'après des formules de Laplace.

Remarque. — Il existe, en outre, dans ces baromètres, d'autres causes d'erreur provenant de ce que les conditions relatives à la construction des baromètres de précision ne sont pas suffisamment remplies. C'est pourquoi il est préférable, quand on le peut, de déterminer la correction totale du baromètre en le comparant avec un baromètre normal *à ménisque ascendant*.

2° *Pression de l'air dans la chambre barométrique.* — Les traces d'air qui peuvent se trouver au-dessus du mercure exercent sur lui une pression qui est inversement proportionnelle au volume de la chambre. Si donc on détermine la correction pour une position quelconque du niveau, on pourra la calculer pour les autres positions. Pour cela, on compare, pour une certaine capacité de la chambre, connue à l'aide d'un jaugeage préalable, le baromètre en question à un autre de ces instruments, de même précision, dont le ménisque supérieur a été ramené toujours au même niveau.

Du reste, dans un baromètre qui a été rempli dans le vide et bouilli, la pression de l'air est si faible, qu'on ne la constate que par une série d'observations précises.

3° *Tension des vapeurs mercurielles.* — Les vapeurs de mercure qui se forment dans la chambre à vide peuvent aussi déprimer le ménisque supérieur, d'autant plus que la température est plus élevée. Mais il résulte des expériences de plusieurs physiciens[1] que cette dépression reste toujours si petite à toutes les températures auxquelles un baromètre peut être exposé, que toute correction de ce chef serait illusoire.

4° *Compressibilité du mercure.* — La hauteur barométrique normale peut être rapportée à une colonne de mercure qui serait soustraite à la compression qu'elle exerce sur elle-même par son propre poids. On calcule que la contraction d'une colonne de 760 millimètres, sous son propre poids, peut aller à 0,0027 mm. Cette correction croît *avec le carré de* la hauteur, et il peut se faire

1. *Entre autres, Regnault, Hagen, Hertz*, etc.

que, dans certaines mesures au manomètre, il ne soit pas illusoire d'en tenir compte.

5° *Forces électriques.* — Le mercure d'un baromètre se charge à un certain potentiel négatif dont la valeur dépend de ses mouvements dans le tube et de l'état électrique et hygrométrique de l'air. Les corps environnants peuvent donc exercer sur le mercure des forces attractives ou répulsives, suivant leur état. L'effet de ces forces est mal connu; il est sans doute extrêmement faible. Le seul phénomène électrique qui paraisse bien constaté jusqu'ici est le suivant. Lorsqu'on approche une pointe d'un ménisque pour déterminer sa position, le mercure se soulève, touche la pointe, et redescend aussitôt. L'amplitude de ce mouvement peut atteindre plusieurs microns.

154. **Construction des baromètres.** — 1° *Choix du liquide barométrique.* — On doit prendre le mercure de préférence à tout autre liquide, pour plusieurs raisons : pour sa grande densité, pour sa médiocre volatilité, et pour son négligeable pouvoir dissolvant des gaz; car alors l'instrument a de faibles dimensions et l'on a peu à craindre les vapeurs ou les gaz dissous qui se répandraient dans la *chambre barométrique* et déprimeraient le mercure plus ou moins.

Le mercure est ordinairement très pur quand il sort de la mine. On peut l'employer immédiatement à cet état, après l'avoir agité avec des cendres chaudes et filtré à travers une plaque poreuse. Mais quand le mercure a séjourné plus ou moins longtemps chez les marchands ou dans les laboratoires, il faut nécessairement lui faire subir une purification préalable. On emploie plusieurs procédés.

Voici celui des constructeurs : Le mercure, agité avec une solution de nitrate de mercure, est introduit en gouttelettes, par un entonnoir effilé, dans un flacon contenant de l'acide nitrique dilué; puis il est versé dans de l'acide sulfurique concentré; enfin il est maintenu pendant quelque temps dans un flacon rempli de potasse caustique en morceaux, d'où on l'extrait, au fur et à mesure des besoins, par un robinet placé à la partie inférieure.

Du reste, la densité du mercure purifié par divers procédés varie entre des limites très rapprochées[1].

Mercure traité à l'acide nitrique, l'eau ammoniacale, l'eau pure et distillée dans le vide	13,59663
Traité de même, mais séché dans le vide	13,59565
Chauffé avec une solution de bisulfate de potasse, puis filtré dans le vide	13,59660
Mercure du commerce filtré quatre fois	13,59557
Regnault avait obtenu antérieurement	13,5956

Or, une différence d'une unité dans le quatrième chiffre décimal correspond à une variation de hauteur barométrique de 0,006 mm. Donc les plus fortes différences constatées par MM. Wild et Marek introduiraient des erreurs à peine supérieures à 0,01 mm.

2° *Remplissage du baromètre. — Cas du baromètre à cuvette ordinaire.* — On ferme le tube à un bout, puis à l'autre bout on soude provisoirement une ampoule, qu'on en détachera après le remplissage. On y verse alors, jusqu'au col de l'ampoule, du mercure pur; puis on le pose sur une grille de tôle inclinée (fig. 162).

1. *W.-J. Marek, Travaux et Mémoires*, t. II, 1883.

et on l'entoure de charbons incandescents, de manière à le porter à une température voisine de celle de l'ébullition du mercure. On ajoute alors de nouveaux charbons vers la partie inférieure de la grille, afin de faire naître l'ébullition, et, quand elle a été prolongée 4 à 5 minutes, on transporte les charbons un peu plus haut et successivement dans toute la longueur du tube.

Fig. 162.

L'ampoule de l'extrémité supérieure sert à recueillir le mercure qui pourrait être projeté par suite des soubresauts dus à l'ébullition. Une fois le mercure refroidi, on la détache par un trait de lime sur le col; on achève de remplir complètement le tube avec du mercure pur et chaud, puis on ferme hermétiquement en écrasant avec le doigt le bouton convexe qui émerge de l'orifice, comme dans l'expérience de Torricelli (fig. 150); on le renverse dans sa cuvette et le baromètre est construit.

Remarques. — 1° Après l'opération précédente, le mercure a complètement changé d'aspect : les bulles d'air et d'humidité qui adhéraient au verre ont disparu, et le tube présente l'éclat métallique d'un miroir bien étamé. C'est à ce signe qu'on reconnaît que le baromètre est bien purgé de gaz; de plus, lorsqu'on incline doucement le tube, on entend un son sec et métallique produit par le choc du mercure contre le sommet : s'il restait de l'air ou de l'humidité dans la chambre barométrique, le son serait amorti.

2° *Cas des baromètres à siphon.* — Le baromètre de Gay-Lussac se remplit de la même manière. Les deux branches sont d'abord réunies par le tube capillaire, de manière à former un seul et même tube, à peu près rectiligne; une fois le mercure introduit et bouilli, on *courbe le tube dans sa partie* capillaire, en le chauf*fant sur des charbons ou à la lampe* d'émailleur.

Cas des baromètres de précision[1]. — Un baromètre à large tube doit être nécessairement rempli sur place, afin d'éviter les accidents de transport.

On nettoie d'abord l'intérieur du tube avec les liquides suivants : solution de potasse caustique, eau distillée; acide nitrique, eau distillée; ammoniaque, eau distillée; enfin, alcool et éther.

Fig. 165.

Le tube est ensuite soudé à un appareil spécial en verre, qui part du renflement R (fig. 165), et qui consiste en un tube vertical A, élargi dans le haut, et relié par un raccord à une bonne machine pneumatique pouvant faire le vide à une fraction de millimètre. Le tube A porte une petite tubulure latérale effilée, s'engageant dans la branche soudée au baromètre, laquelle communique avec la pompe par le tube de jonction *d*.

Le mercure pompé étant introduit dans l'éprouvette C, on fait le vide dans l'appareil, en même temps qu'on en chauffe toutes les parties, afin de chasser l'humidité; puis on élève l'éprouvette jusqu'à ce que le mercure, atteignant le tube latéral en A, s'écoule en petites gouttes, par le réservoir A, jusque dans le baromètre.

On arrête l'opération à plusieurs reprises et l'on fait bouillir fortement la dernière portion de mercure introduite. Cette opération demande les plus grandes précautions.

155. **Prévision du temps par le baromètre.** — Un des principaux usages du baromètre, dans la pratique, est la prévision du temps par les variations de la hauteur barométrique. Nous allons examiner jusqu'à quel point cet usage est légitime et rationnel.

On a observé, *dans nos climats*, que le baromètre se tient communément, par le beau temps, au-dessus de 0,758 m, tandis qu'il se tient au-dessous de cette hauteur par les temps de pluie, de neige, de vent ou d'orage; et enfin que, lorsqu'il est à 0,758 m, il y a en moyenne autant de jours de beau temps que de jours de pluie. Cette concordance remarquable justifie donc dans une certaine mesure l'emploi du baromètre pour la prévision du

1. *Procédé du Bureau international des poids et mesures.* Voir Ch.-Ed. Guillaume, *loc. cit.*

temps. On adapte à l'instrument, pour cet usage, une petite graduation spéciale. Elle comprend les temps probables qui correspondent à des variations de pression de 9 millimètres, un peu au-dessus et un peu au-dessous de 0,758 m.

Hauteur.	État de l'atmosphère.
785 millimètres	Très sec.
776 —	Beau fixe.
767 —	Beau temps.
758 —	Variable.
749 —	Pluie ou vent.
740 —	Grande pluie.
731 —	Tempête.

Règle empirique. — Lorsque le baromètre monte ou descend d'une manière lente et continue pendant deux ou trois jours, vers le beau temps ou vers la pluie, *l'arrivée ou la persistance du beau temps ou de la pluie peut être considérée comme très probable.* Quant aux variations brusques, dans l'un ou l'autre sens, elles présagent la pluie ou le vent, ou même la tempête.

Fig. 164.

156. Baromètre à cadran. — L'un des instruments auxquels on adapte le plus communément cette graduation météorologique est le vieux *baromètre à cadran*, imaginé par Hooke, en 1665.

L'organe apparent est un cadran plus ou moins orné, qui porte, étalée en cercle, une graduation météorologique : *beau temps*, *variable*, etc.; une longue aiguille la parcourt (fig. 164), mise en mouvement par le mercure même de l'instrument, au moyen du mécanisme représenté à droite de la figure. A l'axe de l'aiguille est fixée une poulie O, sur laquelle s'enroule un fil qui porte à l'une de ses extrémités un poids P, et à l'autre un flotteur un peu *plus pesant que ce poids, et soutenu par le mercure de la petite branche du siphon. Quand la pression atmosphérique* vient à augmenter, le niveau

mais cette graduation, peu précise, même au début, ne tarde pas à le devenir de moins en moins, par suite d'une variation lente dans l'élasticité du ressort métallique et d'une déformation correspondante de ce dernier.

2° *Baromètre de Vidi.* — L'application la plus heureuse de ce principe est celle que Vidi lui-même a faite dans le baromètre qui porte son nom. Il se compose d'un tronc de cylindre métallique dont la base inférieure est plane et la base supérieure cannelée circulairement (fig. 165). On y fait le vide

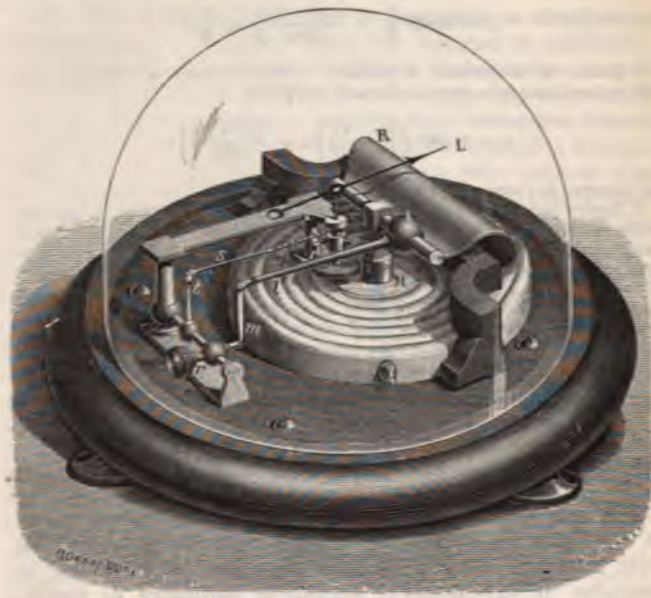


Fig. 165.

intérieurement et la pression atmosphérique s'exerçant, sans contrepoids, sur la face supérieure, tend à aplatir plus ou moins cette espèce de boîte. Les plis métalliques *n'augmentent pas la pression proportionnellement à leur surface*, car la résultante des pressions que l'atmosphère exerce sur eux ne dépend que de la superficie de leur projection horizontale, mais ils accroissent beaucoup la flexion correspondante à une même pression. Cette flexion produit le déplacement vertical d'un pilier métallique, court et gros, M, fixé au centre de la base cannelée. Ce mouvement se transmet à une aiguille L, mobile sur un cadran divisé, par l'intermédiaire d'un puissant ressort R, de tiges articulées *l* et *m*, de l'axe *r*, de la tige articulée *t* et de la chaîne *s*, laquelle vient s'enrouler sur la poulie qui porte l'aiguille et y est tendue au moyen d'un petit ressort *antagoniste*.

3° *Baromètre de Bourdon.* — Il est formé (fig. 166) d'un tube métallique aplati (dont la section est représentée en S), dans lequel on a fait le vide et qu'on a fixé par son milieu. Quand la pression atmosphérique augmente, comme elle n'est pas équilibrée intérieurement, le tube s'aplatit davantage, sa section s'élargit et sa longueur diminue : il en résulte que la courbure s'accentue et que les deux extrémités se rapprochent. C'est le mouvement contraire qui se produit lorsque la pression atmosphérique diminue. Ces déplacements sont transmis à l'aiguille par l'intermédiaire de deux tiges articulées à un levier mobile autour de son point fixe. Ce levier est fixé par ses deux bras aux tiges articulées et par son centre à un secteur denté, auquel il transmet les mouvements du tube métallique ; le secteur engrène avec un pignon qui porte l'aiguille et la fait mouvoir sur un cadran divisé où l'on a marqué les indications *variable, beau temps, beau fixe*, etc.

Fig. 166.

4° *Avantages et inconvénients des baromètres métalliques.* — Ces baromètres sont très commodes, très portatifs, très sensibles, mais peu précis. L'élasticité du métal se modifie par le jeu même de l'instrument, de manière que celui-ci, après avoir été bien réglé au début, ne l'est plus au bout de peu de temps. Ce défaut est particulièrement sensible dans les baromètres (de poche) qui servent aux courses et aux ascensions aérostatiques, où ils subissent des variations de pression brusques et considérables. Pour apprécier la précision d'un instrument de ce genre, il faut l'essayer, comparativement à un baromètre à mercure, dans un récipient où l'on fait varier graduellement la pression entre les limites pour lesquelles il est construit. Cet essai doit être répété de temps à autre, à titre de *vérification*[1].

1. Nous décrirons *plus loin, dans la Météorologie*, les *baromètres* enregis-

CHAPITRE II

STATIQUE DES GAZ

—

PRINCIPE D'ARCHIMÈDE ET AÉROSTATS.

159. **Extension du principe d'Archimède au cas des gaz.** — Tous les gaz en général, et l'atmosphère en particulier, étant pesants, exercent, comme les liquides en équilibre, des pressions normales sur les corps solides qui y sont immergés. Ces pressions ont une résultante qui est déterminée, comme pour les liquides, par le principe d'Archimède, qu'on peut généraliser comme il suit :

Lorsqu'un corps solide est entièrement plongé dans *un fluide pesant en équilibre*, les pressions qui s'exercent à sa surface ont une résultante unique, égale et directement opposée *au poids du volume fluide déplacé* et appliquée au centre de gravité de ce volume.

On peut démontrer ce principe *à priori* pour les gaz, comme on l'a fait précédemment (158) pour les liquides. On peut aussi le vérifier expérimentalement à l'aide d'un petit appareil appelé *baroscope*.

160. **Expérience du baroscope.** — 1° *Description.* — Cet appareil consiste en une sorte de petite balance dont le fléau supporte, au lieu de plateaux, d'un côté une petite masse de plomb *b*, et de l'autre une sphère de cuivre creuse *a*, dont le volume est environ d'un demi-centimètre cube (fig. 167). On peut régler la distance de la masse *b* de manière que les deux corps se fassent équilibre, soit dans l'air, soit dans le vide.

2° *Usages.* — Cet instrument avait été inventé par Otto de Guericke pour mesurer, ou tout au moins pour indiquer, les variations de la pression atmosphérique[1]. Il ne sert plus qu'à manifester l'existence de la poussée des gaz et à vérifier le principe d'Archimède, sous la forme suivante :

treurs, spécialement employés pour *enregistrer*, c'est-à-dire pour noter d'une manière continue, les variations incessantes de la pression atmosphérique en *un lieu donné*.

1. *C'est de là que lui* vient son nom (de βάρος, pesanteur, et σκοπέω, examiner).

Tout corps plongé dans un gaz paraît y perdre une partie de son poids égale au poids du gaz qu'il déplace.

On commence par établir dans l'air l'horizontalité du fléau; puis on place l'appareil sous un récipient où l'on fait le vide : on voit alors le fléau s'incliner du côté de la grosse sphère (fig. 167). Cela prouve évidemment que le poids réel de la sphère est plus fort que celui de la petite masse de plomb, puisque actuellement elles ne supportent ni l'une ni l'autre aucune poussée sensible et qu'elles obéissent librement à la pesanteur. Si donc elles se faisaient équilibre dans l'air, c'est que l'excès de poids de la grosse sphère était compensé par l'excès de poussée qu'elle subissait de la part du gaz : ce qui prouve l'existence de cette poussée.

Fig. 167.

On pourrait faire l'expérience inverse, c'est-à-dire équilibrer la sphère d'abord dans le vide, à l'aide du contrepoids, puis laisser rentrer l'air sous le récipient : on verrait le fléau s'incliner, cette fois, du côté de la masse de plomb.

3° *Théorie du baroscope.* — En admettant d'avance le principe d'Archimède, on peut prévoir ces deux mouvements en sens contraires et calculer les différences de poussée d'où ils résultent dans les deux cas.

Soient P le poids réel de la boule et V son volume; p le poids réel du contrepoids et v son volume. Imaginons qu'on établisse l'équilibre du baroscope dans une atmosphère où la pression soit H et le poids spécifique de l'air a; on peut choisir le contrepoids p de manière que les bras de levier du fléau soient égaux lorsque l'équilibre a lieu. Alors l'équation d'équilibre, fondée sur le principe d'Archimède, est

$$[1] \qquad P - Va = p - va, \qquad \text{ou bien} \qquad (P - p) - (V - v)\,a = 0.$$

Si la pression atmosphérique devient H', *soit qu'on laisse l'instrument dans l'atmosphère libre, soit qu'on le mette sous la cloche* d'une machine pneumatique, *le poids du litre d'air deviendra* a' : alors l'équation d'équilibre cessera

d'être satisfaite, puisque, le terme positif restant constant, le terme négatif varie en même temps que a. On aura

$$P - p - (V - v)a' \gtrless 0.$$

Le fléau s'inclinera dans un sens ou dans l'autre, suivant qu'on aura

$$P - p - (V - v)a' > 0 \qquad \text{et par suite} \qquad a' < a$$

ou bien

$$(P - p) - (V - v)a' < 0 \qquad \text{et par suite} \qquad a' > a.$$

Par conséquent l'inclinaison du fléau indiquera directement ces variations de densité et, par suite, les variations de la pression atmosphérique.

161. Conséquences du principe d'Archimède : Poids réels et poids apparents. — Correction des pesées faites dans l'air. — Les corps perdant dans l'air une partie de leur poids égale au poids du gaz qu'ils déplacent, il y a lieu de distinguer entre leur *poids réel*, c'est-à-dire leur *poids dans le vide*, et leur *poids apparent*, c'est-à-dire leur *poids dans l'air*. La balance ne donne pas le poids réel, mais seulement le poids apparent.

On peut déduire du poids apparent d'un corps son poids réel. Soient p son poids réel en kilogrammes et d son poids spécifique, $\frac{p}{d}$ sera le volume du corps en litres. Soit a le poids d'un litre d'air dans les conditions de température ou de pression où s'est faite la pesée ; celui de l'air déplacé par le corps est $a\frac{p}{d}$. Donc son poids apparent est

$$p - a\frac{p}{d} \qquad \text{ou} \qquad p\left(1 - \frac{a}{d}\right).$$

De même, les poids marqués qui servent dans la pesée ont été échantillonnés dans le vide : ils n'interviennent donc, dans l'équilibre du fléau, que par leur poids apparent. Soient P la somme de ces poids et D la densité de leur substance, on trouve de même que leur poids apparent est $P\left(1 - \frac{a}{D}\right)$. Si la balance est juste, ces deux poids apparents sont égaux, et l'on peut écrire l'équation d'équilibre

$$p\left(1 - \frac{a}{d}\right) = P\left(1 - \frac{a}{D}\right),$$

d'où l'on tirera la valeur de p.

162. Conséquences du principe d'Archimède : Équilibre des corps immergés dans l'atmosphère. — On peut appliquer aux corps plongés dans l'air ou dans tout autre gaz tout ce qui a été dit des corps plongés dans les liquides (118). Soient V le volume d'un corps, D son poids spécifique à la température de l'atmosphère ambiante et a le poids spécifique actuel de l'air atmosphérique : le corps est soumis à deux forces verticales et opposées, *son poids* VD et la poussée de l'air Va, dont la résultante est une *force verticale, d'intensité* égale à V(D — a) et dirigée dans le *sens de la plus grande*. Il y a trois cas à considérer.

1° $D > a$; c'est-à-dire que *le corps est plus dense que l'air*, ce qui est le cas le plus général : il tombe à terre, entraîné, non par son poids réel VD, mais par son poids apparent $V(D - a)$.

2° $D = a$; c'est-à-dire que *le corps a la même densité que l'air* : son poids et la poussée de bas en haut se font équilibre et le corps flotte dans l'atmosphère.

3° $D < a$; c'est-à-dire que *le corps est moins dense que l'air* : c'est la poussée qui l'emporte et le corps s'élève jusqu'à ce qu'il rencontre des couches d'air de même densité que lui. La force d'ascension est égale alors à $V(D - a)$.

Ces deux derniers cas s'appliquent aux corps flottant dans l'atmosphère, parmi lesquels on peut citer la fumée, les vapeurs, les nuages et surtout les aérostats.

163. Aérostats : montgolfières et ballons. — 1° *Définitions.* Les *aérostats*[1] sont des globes d'étoffe légère et imperméable, qui, remplis d'air chaud, d'hydrogène ou de tout autre gaz plus léger que l'air, s'élèvent dans l'atmosphère ou s'y tiennent en équilibre, conformément aux conditions d'équilibre des corps flottant dans les gaz.

Les premiers aérostats furent gonflés à l'air chaud : on les appelle plus particulièrement *montgolfières* (du nom de leurs inventeurs, les frères *Montgolfier*). On ne les remplit guère aujourd'hui qu'à l'hydrogène ou au gaz d'éclairage; et on les appelle ordinairement *ballons*[2].

Les hommes qui montent dans l'aérostat et exécutent la manœuvre de cette sorte de navigation aérienne, se nomment des *aéronautes*[3].

Les principaux perfectionnements de l'invention des Montgolfier furent apportés, dès le début, par le physicien Charles.

2° *Forme des aérostats.* — La première forme qui ait été donnée aux aérostats est celle d'un globe à peu près sphérique, terminé à sa partie inférieure par un appendice cylindrique ou conique. Dans la montgolfière, cet appendice était percé d'une large ouverture par où s'introduit l'air chauffé; dans le ballon (fig. 168), l'appendice se termine par une pointe munie d'un étroit orifice, par où le gaz hydrogène peut s'échapper en cas de dilatation

1. Ce mot vient de ἀήρ, air, et ἵστάω, je suis debout, en latin *stare*).

2. On peut faire rentrer dans la catégorie des aérostats les machines volantes qu'on appelle *aéronefs*. Mais ce sont des aérostats *plus lourds que l'air*, des sortes d'*oiseaux artificiels*, qui empruntent au mécanisme physiologique du vol les moyens de se soutenir et de progresser dans l'air. La construction de ces appareils *plus lourds que l'air, qui constitue le problème de l'aviation*, est encore *peu avancée*.

3. De ἀήρ, air, et ναύτης, navigateur.

exagérée, de manière à éviter une rupture par excès de pression. De plus, tous les ballons sont munis, à leur partie supérieure, d'une autre ouverture, fermée à l'aide d'une soupape à ressort. L'aéronaute peut ouvrir à volonté cette soupape, à l'aide d'une corde qui y est attachée (fig. 168). Cette forme sphérique est encore le plus ordinairement employée. Toutefois dans ces derniers temps on a construit des ballons dirigeables, de forme ellipsoïdale. On réduit ainsi au minimum la résistance de l'air ; mais on diminue également la solidité de l'enveloppe. On est alors obligé d'employer pour ces ballons allongés des étoffes plus solides, plus résistantes et partant plus lourdes.

Fig. 168.

3° *Structure de l'enveloppe.* — L'enveloppe des aérostats doit être faite avec une étoffe à la fois solide et imperméable aux gaz, surtout pour les ballons à hydrogène. Le physicien Charles construisait ses ballons avec du taffetas de soie, recouvert d'un enduit de caoutchouc. Giffard obtint une imperméabilité presque parfaite en fabriquant l'enveloppe avec deux tissus de toile, séparés par une feuille de caoutchouc, et recouverts d'une feuille de mousseline, vernie elle-même à la gomme laque et peinte de plusieurs couches à l'huile.

4° *Filet et nacelle.* — Tous les aérostats destinés à enlever des aéronautes sont munis d'une nacelle et d'un filet. Celui-ci protège le ballon, dont il recouvre tout l'hémisphère supérieur; un peu au-dessous du grand cercle équateur, toutes les cordes du [illegible] détachent, en s'écartant de la surface du ballon, et vien-

nent aboutir et s'attacher à la circonférence d'un cercle en bois très dur, auquel est suspendue la nacelle (fig. 168). Celle-ci se compose d'une sorte de panier en osier plus ou moins vaste, suivant l'usage auquel on la destine (fig. 169).

5° *Accessoires usuels.* — Parmi ces accessoires ou instruments, il y en a deux qui sont pour ainsi dire indispensables : le *lest* et un *baromètre*.

Fig. 169.

Le *lest* se compose d'un certain nombre de sacs de toile pleins de sable. Ils ne servent pas en réalité à *lester* le ballon, c'est-à-dire à augmenter sa stabilité, comme fait le lest des navires; mais on peut, en les vidant à propos, régler l'ascension, modérer la vitesse de chute ou l'annuler à propos. Quant au *baromètre*, il est le compagnon obligé de toutes les ascensions : c'est la marche de la colonne barométrique qui peut seule indiquer à l'aéronaute, à partir d'une certaine altitude, si l'aérostat monte ou descend.

Enfin, on emporte généralement un rouleau de corde à nœuds, d'une cinquantaine de mètres (*guide-rope*), avec une ou deux ancres (fig. 169).

6° *Construction des aérostats.* — Le tissu qui doit former l'enveloppe est découpé d'abord en longs fuseaux, qui constituent comme les méridiens d'une sphère. On les coud ensemble, avec beaucoup de soin, de manière à ne laisser entre eux ni interstices, ni fissures, *ni même les trous* des piqûres d'aiguilles, *par où le gaz intérieur pourrait s'échapper*.

7° *Gonflement des montgolfières.* — Dans ce cas l'opération est très simple. Il suffit de placer un réchaud au-dessous de l'ouverture de l'enveloppe et d'y brûler des matières combustibles. L'air échauffé s'élève au-dessus du foyer, s'engouffre dans l'ouverture de l'enveloppe, en distend les parois et finit par remplir l'aérostat en lui donnant la forme sphérique.

Mais on ne peut conserver à celui-ci sa température initiale qu'en l'entretenant à l'aide d'un foyer permanent, que doit emporter la montgolfière, ce qui constitue un danger continuel d'incendie quel que soit le procédé de chauffage employé.

8° *Gonflement des ballons à hydrogène.* — On a longtemps préparé ce gaz par la méthode ordinaire : la réaction de l'acide sulfurique dilué sur le zinc ou le fer.

Le commandant Renard a récemment indiqué un procédé plus expéditif et beaucoup moins coûteux : il consiste à électrolyser une solution de potasse étendue où l'on amène le courant d'une machine dynamo-électrique par des électrodes en fer[1].

A mesure que le ballon se remplit, des hommes le retiennent au moyen de cordes fixées au filet. Quand il est suffisamment plein, on enlève le tube à gaz; l'aéronaute se place enfin dans la nacelle; au cri de *Lâchez tout!* on lâche les cordes, et le ballon s'élève avec une vitesse d'autant plus grande, qu'il est plus léger par rapport à l'air déplacé.

9° *Ballons au gaz de l'éclairage.* — L'hydrogène est le plus avantageux des gaz au point de vue aérostatique, parce qu'il est le plus léger des gaz; mais son prix de revient élevé lui fait préférer ordinairement le gaz de l'éclairage, dont la densité est beaucoup plus grande (environ 0,65), mais qu'on peut obtenir aisément, et à peu de frais, partout où il y a des usines à gaz (fig. 170).

Remarque. — Dans aucun cas l'on ne gonfle complètement l'aérostat. Cette précaution offre deux avantages : le premier, de laisser le gaz intérieur se dilater librement et sans danger de rupture pour l'enveloppe à mesure que la pression extérieure diminue par suite de l'ascension dans les couches supérieures de l'atmosphère; le second, de conserver à l'aérostat une force d'ascension à peu près constante.

164. **Théorie des aérostats. — Force ascensionnelle.** — Tout aérostat plongé dans l'atmosphère y est soumis à deux forces :

1. *Ce procédé* avait été déjà indiqué, à l'insu du commandant Renard, par *M. d'Arsonval.*

1° Son poids total P, force verticale et dirigée de haut en bas (gaz, enveloppe, nacelle, aéronautes, agrès, instruments, etc.).

2° La poussée P′, force verticale et dirigée de bas en haut, qui, est égale au poids du volume d'air déplacé par l'aérostat *tout entier*.

Si la poussée P′ est plus forte que le poids P, l'aérostat montera dans l'atmosphère, sous l'influence d'une force F, verticale et dirigée de bas en haut, égale à la différence P′ — P. Cette force accélératrice F s'appelle la *force ascensionnelle* de l'aérostat.

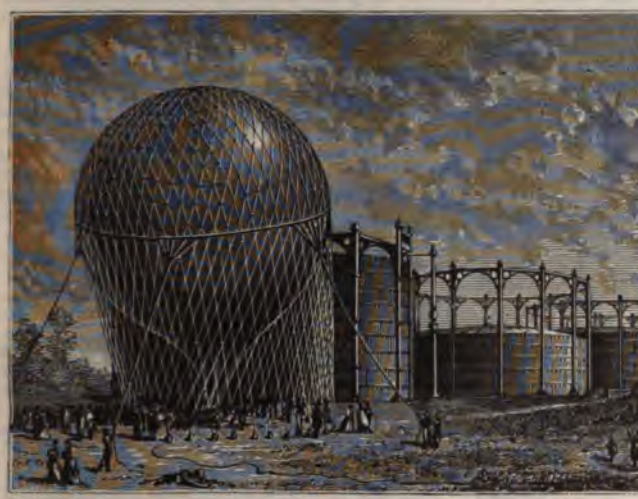


Fig. 170.

Il suffit que la force F soit de 4 à 5 kilogrammes au départ pour que l'aérostat s'enlève.

Remarque. — La force ascensionnelle reste *sensiblement constante* tout le temps que le ballon n'est pas complètement gonflé par la dilatation du gaz intérieur, si toutefois l'on néglige le poids de l'enveloppe et des agrès, qui sont d'ailleurs négligeables par rapport au poids total. En effet, si la pression atmosphérique devient, par exemple, deux fois plus petite à une certaine altitude, le gaz de l'aérostat (d'après la loi de Mariotte, que nous étudierons *plus loin) doublera de volume*. Il en résulte que *le volume d'air déplacé deviendra lui-même* deux fois plus

grand; en même temps, les densités des deux gaz deviendront deux fois moindres : donc ni le poids intérieur P ni la poussée P′ ne changeront, ni par suite la force ascensionnelle F, qui est égale à P′ — P.

Mais une fois que le ballon est complètement gonflé, s'il continue à s'élever, la force ascensionnelle décroît nécessairement; car, le volume d'air déplacé restant le même, sa densité diminue, et il vient un moment où la poussée est égale au poids du ballon. On est alors dans le cas d'équilibre, ou P = P′; la force F est nulle, et l'aérostat ne peut monter; il ne peut que suivre une direction horizontale, emporté par les courants aériens qui règnent dans l'atmosphère.

Calcul de la force ascensionnelle. — Soient V la capacité du ballon (supposé complètement gonflé), exprimée en mètres cubes; a le poids du mètre cube du gaz à 0° et sous 76 cm; a' le poids du mètre cube de l'air, dans les mêmes conditions; S la surface de l'enveloppe extérieure (non compris celle de la nacelle et des agrès), δ le poids moyen de l'unité de surface de l'enveloppe, et Π le poids total de l'ensemble des accessoires. On aura évidemment (en négligeant la poussée de l'air déplacé par les accessoires)

$$P' = Va' \quad \text{et} \quad P = Va + \Pi,$$

d'où

$$F = V(a' - a) - \Pi.$$

Force ascensionnelle spécifique des gaz. — Le terme positif de cette formule est de beaucoup le plus important. Le facteur $(a' - a)$, qui est égal à la différence des poids du mètre cube de l'air et du gaz, dans les conditions normales, s'appelle quelquefois *force ascensionnelle spécifique* du gaz.

Ainsi, pour l'*air chaud* des montgolfières, la *force ascensionnelle spécifique* est

46 grammes à	. . . . .	10°
558 —	. . . . .	50°
1015 —	. . . . .	200°

Pour l'*hydrogène*, le coefficient $(a' - a)$ est notablement plus élevé : il est de 1205 grammes à 0°.

Pour le *gaz de l'éclairage*, la valeur moyenne est de 695 grammes.

Ce coefficient varie nécessairement avec la température et la pression : il diminue quand la pression diminue et quand la température s'élève.

Exemple numérique. — On peut citer le ballon captif construit par Giffard en 1878, et qui fit plusieurs ascensions par jour, dans la cour des Tuileries, pendant toute la durée de l'Exposition universelle.

L'enveloppe sphérique avait 36 mètres de diamètre; par suite, lorsqu'elle était entièrement gonflée d'hydrogène, sa capacité était de 25 000 mètres cubes. Le terme positif $V(a' - a)$ de la force ascensionnelle s'élevait donc au moins à 25 000 kilogrammes. Le poids total, enlevé par l'aérostat, s'élevait à 18 850 kilogrammes, se décomposant de la manière suivante :

Enveloppe et soupapes.	5 000	kilogrammes.
Filet et cordages	4 500	—
Nacelle avec son arrimage	1 600	—
Câble accessoire.	750	—
Câble de 600 mètres retenant le ballon . . .	5 000	—
Poids moyen de 50 voyageurs	4 000	—
	18 850	poids total.

Il restait donc un excédent de force qui dépassait 6000 kilogrammes[1]. Ajoutons, à titre de curiosité, que le câble de 600 mètres, à l'aide duquel le ballon colossal était retenu captif, était enroulé sur un treuil pendant la descente, et qu'il ne fallait pas moins de deux machines à vapeur de 300 chevaux pour exécuter ce travail.

165. **Parachute.** — Un accessoire des aérostats a joui d'une grande vogue à l'époque de son apparition, mais est totalement abandonné aujourd'hui : c'est le *parachute*. Cet appareil, comme son nom l'indique, était destiné à parer aux éventualités d'une chute provoquée soit par déchirure du ballon, soit par tout autre accident. Il se compose d'une large toile circulaire, formée de fuseaux cousus ensemble comme l'enveloppe d'un ballon, et qui peut se ployer ou se déployer comme un vaste parapluie (fig. 171). Au centre de la toile, on a ménagé une petite ouverture circulaire, et sur le pourtour est fixé un système de cordes, qui vont se rattacher à la nacelle de l'aérostat, de manière à l'envelopper et à le soutenir, en cas de besoin, comme les cordes mêmes du ballon.

Fig. 171.

Pendant l'ascension, le parachute, *plié* comme un parapluie, est fixé par un point de son enveloppe à celle du ballon. Quand l'aéronaute veut s'en servir, il rompt d'une part les attaches du ballon avec la nacelle, et celle du ballon avec le parachute. Celui-ci, emporté par la nacelle, tombe d'abord d'un mouvement accéléré; mais la résistance de l'air force le parapluie à s'ouvrir de plus en plus (fig. 171) et ralentit la chute du système dans une proportion considérable. Ainsi, dans une descente en parachute que l'aéronaute Sivel exécuta à Naples, il mit 45 *minutes pour tomber d'une hauteur de* 1800 *mètres*; or il n'aurait mis en chute libre (abstraction faite de la résistance de l'air) qu'environ 19 *secondes* : il serait donc tombé 135 *fois et demie* plus vite.

166. **Navigation aérienne** ou **direction des ballons.** — 1° *Définitions.* — Nous avons dit que l'aéronaute, avec les moyens dont il dispose, ne peut qu'agir sur la force ascensionnelle de l'aérostat, de manière à ralentir ou à accélérer son mouvement dans le sens vertical, mais que les mouvements de progression ou

[1] *J. Guillemin, Monde physique*, t. Ier.

de recul dans le sens horizontal sont soustraits à sa volonté et entièrement soumis aux vents qui règnent dans la région où il se trouve. Or le problème de la *navigation aérienne* ou de la *direction des ballons* consiste précisément dans la possibilité de pousser l'aérostat horizontalement dans tous les sens, quelle que soit la direction du vent, comme on fait d'un bateau sur l'eau.

2° *Historique.* — Le problème s'est posé dès l'origine même de l'invention des aérostats, et il a paru tout d'abord très simple. Toutes les solutions proposées étaient fondées sur l'assimilation de la navigation aérienne à la navigation terrestre. On partait de cette idée fausse que, si les vents suffisent pour diriger les vaisseaux, ils peuvent rendre le même service pour les ballons. Or les conditions ne sont pas du tout les mêmes pour ceux-ci et pour ceux-là. Les navires peuvent être dirigés par le vent, parce qu'ils prennent un point d'appui sur l'eau en dehors du vent, tandis que les aérostats, n'ayant aucun point d'appui en dehors du vent, ne peuvent que céder au vent.

« Le vent peut être fort ou faible, l'aéronaute ne le sent plus, parce que lui-même et son aérostat en font partie. Il voit la fumée d'un cigare, la flamme d'une bougie monter tranquillement, les cordes du ballon pendre verticalement sans bouger, les plis d'un drapeau rester au repos. *En ballon, il n'y a pas, il ne peut y avoir de vent*[1]. » Il est donc absurde de songer à l'utiliser, au moyen d'un organe quelconque, pour diriger l'aérostat.

3° *Solution rationnelle.* — La solution du problème de la navigation aérienne se trouvera dans une imitation plus rationnelle de la navigation terrestre.

Il suffit de remarquer qu'un aérostat flottant dans une couche d'air, où son poids est équilibré par la poussée, est dans les mêmes conditions mécaniques qu'un bateau sans voiles flottant sur l'eau à l'abri du vent.

Si l'air est en repos, l'aérostat, dénué lui-même de force motrice propre, demeurera éternellement dans la position d'équilibre qu'il aura une fois prise. Il n'en pourra sortir que s'il est animé d'une vitesse propre, par l'action d'un moteur intérieur quelconque. Si, par exemple, on fixe à la nacelle une hélice à axe horizontal et qu'on la fasse mouvoir avec une rapidité suffisante, elle poussera l'aérostat, en prenant son point d'appui sur la masse d'air, exactement comme fait l'hélice d'un bateau en prenant son point d'appui sur l'eau. Quant à la direction de ce navire aérien, elle sera obtenue à l'aide d'un gouvernail, placé à l'arrière, qui fonctionnera dans l'air comme celui des bateaux fonctionne dans l'eau et d'après le même mécanisme.

Dans la navigation aérienne, on retrouvera les trois cas de la navigation ordinaire :

1° $v > v'$: la vitesse propre v de l'aérostat est supérieure à la vitesse v' du courant aérien, c'est-à-dire du vent ;

$\left.\begin{array}{l} 2^\circ\ v = v' \\ 3^\circ\ v < v' \end{array}\right\}$: la vitesse propre est égale ou inférieure à celle du vent.

Dans le premier cas, un aérostat, *construit et gréé convenablement*, sera parfaitement dirigeable, et la manœuvre se fera dans l'air comme dans l'eau ; dans le second cas, l'aérostat ne pourra que lutter contre le vent, sans bouger de place ; dans le troisième cas (fig. 172), il sera nécessairement entraîné par le vent, mais il pourra encore louvoyer, c'est-à-dire manœuvrer de manière à prendre une direction « plus ou moins inclinée sur celle du vent.

Tout aérostat sera donc *théoriquement* dirigeable, s'il satisfait aux conditions suivantes :

1° Être muni d'un moteur, à la fois léger et puissant, capable de lui imprimer une vitesse notable sans trop diminuer sa force ascensionnelle ;

2° Être gréé comme un bateau à vapeur, c'est-à-dire pourvu d'une hélice et

[1] *J. Jamin, les Ballons.*

d'un gouvernail, qui soient appropriés au milieu gazeux où le mouvement doit se produire.

Dans la pratique, un tel aérostat ne sera réellement dirigeable qu'au sein d'une atmosphère calme, ou contre un vent de vitesse inférieure à sa vitesse propre; or ces conditions pratiques sont très rares et très difficiles à réaliser.

Fig. 172.

4° *Essais de réalisation de la solution rationnelle. — Expériences de Giffard.* — Les premiers essais sérieux de navigation aérienne sont dus à l'ingénieur Giffard. Il fit deux expériences, l'une en 1852, l'autre en 1855. Dans l'une et l'autre il se servit de ballons à hydrogène, construits d'après les règles précédentes.

« L'ascension de cet aérostat se fit heureusement, la machine évolua; mais pendant la descente elle ne put garder son équilibre; elle tomba sur pointe et le ballon, s'échappant du filet, se perdit[1]. »

Expériences de Dupuy de Lôme. — Ces expériences sont très coûteuses. Aussi ne furent-elles reprises que vingt

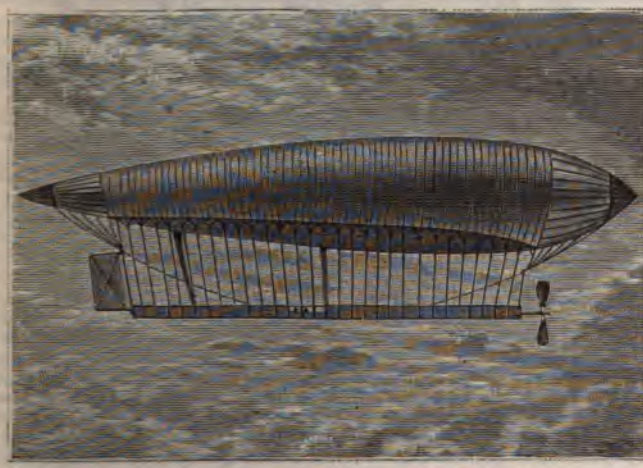


Fig. 173.

ans plus tard, aux frais du *gouvernement* de la Défense Nationale, qui, en 1870,

1. Jamin, *les Ballons*.

confia à Dupuy de Lôme la construction d'un ballon dirigeable. C'était un ballon gonflé au gaz de l'éclairage, de forme ovale et oblongue comme celui de Giffard, mais beaucoup plus gros (environ 3500 mètres cubes), ce qui permettait d'enlever un moteur plus puissant.

Dupuy de Lôme partit lui-même dans son appareil, le 2 février 1872, malheureusement par un assez mauvais temps. L'aérostat s'avança dans une direction inclinée sur celle du vent. La déviation, calculée d'après la vitesse v et v', devait être de 15° : on observa une déviation de 10° à 12°. La vérification des principes pouvait donc être considérée comme faite par cette expérience.

Fig. 174.

Expériences des capitaines Renard et Krebs. — Un grand progrès fut réalisé, en 1883, par les capitaines Renard et Krebs. Grâce à l'emploi d'un moteur électrique, actionné par des piles légères, ils obtinrent une vitesse propre de 5,6 m. Cette vitesse leur suffit dès le premier jour pour vaincre la vitesse du vent et pour assurer le plein succès de leur expérience [1].

Leur aérostat était un ballon de 1800 mètres cubes, pouvant enlever une charge totale de 2000 kilogrammes. Il était de forme allongée, et muni d'une hélice et d'un ballonnet (fig. 175), d'après les règles posées antérieurement par Dupuy de Lôme. La nacelle avait la forme d'une longue yole de canotage, avec une place laissée au milieu pour les aéronautes; l'hélice était placée à l'avant

1. *Un moteur électrique* avait été employé avant eux, pour le même usage, *par les frères Tissandier* (8 octobre 1883) ; mais ceux-ci n'avaient obtenu qu'une *vitesse de 2,8 m.*

et le gouvernail à l'arrière du navire aérien. L'appareil tout entier pouvait être remisé, dans un vaste hangar, à l'établissement militaire de Chalais, en attendant un temps favorable : *condition indispensable de succès* pour toutes les expériences de ce genre.

L'ascension eut lieu le 9 août 1884, à quatre heures du soir, par un temps calme. « L'aérostat, laissé libre et possédant une très faible force ascensionnelle, s'éleva lentement jusqu'à la hauteur des plateaux environnants. La machine fut mise en mouvement, et bientôt, sous son impulsion, l'aérostat accélérait sa marche, obéissant fidèlement à la moindre indication de son gouvernail[1]. » Arrivés au-dessus du village de Villacoublay (fig. 174), à 4 kilomètres environ de Chalais, les aéronautes décidèrent de rebrousser chemin, et d'essayer de descendre au lieu même du départ. Ils exécutèrent donc, par une manœuvre convenable du gouvernail, un demi-tour sur la droite, puis plus loin un nouveau changement de direction sur la gauche, et bientôt ils vinrent planer à 300 mètres au-dessus du point de départ, où la descente s'effectua sans aucun accident. La figure 174 représente approximativement le tracé de ce voyage aérien[2].

5° *Conclusions.* — L'expérience de MM. Renard et Krebs est la première qui ait donné une démonstration expérimentale complète de la direction des aérostats. On voit qu'il reste beaucoup de progrès à faire dans le même sens, puisque, à Paris même, les vents dont la vitesse est inférieure à 7 mètres et qui permettraient l'emploi de l'aérostat dirigeable, règnent à peine 108 jours par an; tout le reste de l'année, les vents sont plus forts et l'aérostat ne pourrait pas servir.

167. **Ballons montés et ballons non montés. — Sondes aériennes Renard.** — Les derniers perfectionnements de l'aérostation ont été amenés par la substitution des ballons *non montés* aux ballons *montés* ordinaires, en vue de l'exploration des hautes régions de l'atmosphère. Cette idée, émise en 1873 par Claude Jobert, a été étudiée récemment au point de vue pratique par M. Hermite d'une part et par le commandant Renard, qui a donné aux aérostats non montés le nom significatif de *sondes aériennes*.

La sonde aérienne Renard est formée d'un ballon à hydrogène de 6 mètres de diamètre, et dont l'enveloppe, pratiquement imperméable, est réduite au poids minuscule de 45 grammes au mètre carré. Le ballon emporte avec lui les divers instruments de physique destinés aux observations, baromètre, thermomètre, actinomètre, électromètre, etc., ingénieusement transformés de manière à suppléer à l'absence des aéronautes. Ce sont des enregistreurs automatiques du système Richard, notablement allégés et protégés contre les chocs de l'atterrissage par des dispositifs spéciaux appelés *parachocs*. L'instrument est suspendu, comme une araignée au milieu de sa toile, par un système de ressorts en caoutchouc, allant des sommets de la boîte qui le contient à ceux d'une cage en osier ou d'un léger panier. L'ensemble du filet, des enregistreurs et des parachocs ne pèse pas plus de 5 kilogrammes.

Ainsi établie, la sonde Renard, gonflée à l'hydrogène, peut franchir les $\frac{11}{12}$ de la masse atmosphérique et atteindre la région où la pression barométrique est réduite à 62 millimètres de mercure, c'est-à-dire à $\frac{1}{12}$ d'atmosphère. Pour atteindre la même hauteur, un ballon ordinaire — dont l'enveloppe pèse environ 300 grammes par mètre carré — devrait cuber 3700 mètres cubes s'il était gonflé à l'hydrogène, et 12000 mètres cubes s'il était gonflé au gaz d'éclairage.

Par un beau temps, on règle la force ascensionnelle au départ de manière à monter avec une vitesse moyenne de 3 mètres par seconde, et on atteint la

1. *Comptes rendus*, communication de *MM.* Renard et Krebs.

2. Cette *carte a été dressée par MM. Tissandier*, d'après la note scientifique *de MM. Renard et Krebs.*

limite de l'ascension en 2 heures environ. Une légère fente est ménagée dans l'enveloppe, de manière à ne pas arrêter le ballon dans sa course, mais à abréger la durée de son stationnement dans les régions élevées, puis à en déterminer la descente régulière à une vitesse de 2 mètres par seconde.

Ces aérostats d'un nouveau genre rendront sans doute de grands services, en permettant d'aborder directement — sans grands frais et surtout sans périls — l'étude encore si peu avancée des hautes régions de l'atmosphère.

CHAPITRE III

COMPRESSIBILITÉ DES GAZ

—

LOI DE MARIOTTE. — CAS GÉNÉRAL DE LA COMPRESSIBILITÉ. MANOMÈTRES.

168. **Loi de Mariotte.** — Mariotte, physicien français, a le premier[1] énoncé nettement une loi sur la compressibilité des gaz.

Énoncé. — *Les volumes occupés par une masse donnée de gaz, à température constante, sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte.*

Vérification expérimentale. — 1° *Cas des pressions supérieures à une atmosphère.* — *Tube de Mariotte.* — Cette loi fut vérifiée sur l'air au moyen d'un petit appareil qu'on appelle encore aujourd'hui le *tube de Mariotte.* Il est employé dans le cas où l'on soumet la masse gazeuse à des pressions qui croissent au delà de 1 atmosphère.

Sur une planchette de bois, maintenue verticalement, est fixé un tube de verre recourbé, à branches très inégales (fig. 175 et 176). Le long de la petite branche, qui est fermée, court une échelle indiquant des capacités égales, tandis que l'échelle placée le long de la grande branche donne les hauteurs en centimètres. Les zéros des deux échelles sont sur une même ligne horizontale.

1. *Essai sur la nature de l'air*, de l'abbé Mariotte (1676). — Quelques années auparavant (1662), en Angleterre, Boyle avait publié sur le même sujet des expériences (*Nova experimenta de vi aeris elastica*) qui conduisent à la même *conclusion.*

verse d'abord du mercure par le sommet de la grande che de manière que le niveau du liquide s'élève au zéro les deux branches : ce qu'on obtient après quelques tâtonne- s. L'air emprisonné dans la branche courte exerce alors, sur

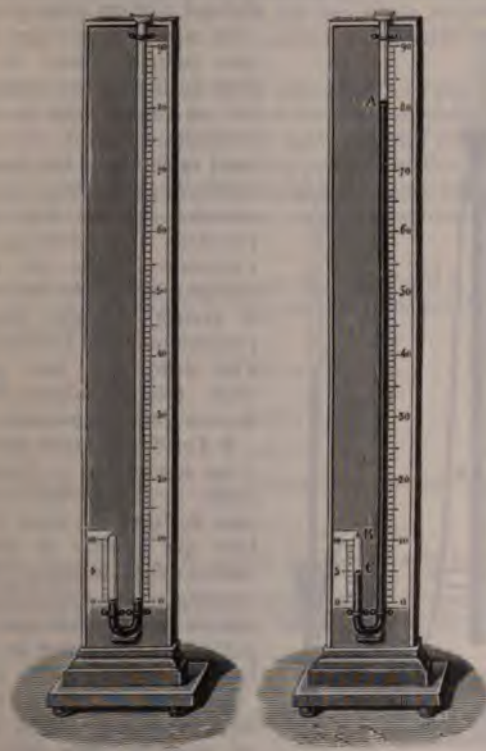


Fig. 175. Fig. 176.

ercure qui s'y trouve, la même pression que l'atmosphère ce sur le mercure de l'autre branche.

verse ensuite du mercure dans le grand tube jusqu'à ré- de moitié le volume de la masse d'air, par exemple de ivisions à 5 (fig. 176). Mesurant alors la distance CA des ux du mercure *dans les deux branches*, on trouve qu'elle

est précisément égale à la hauteur barométrique du moment. La pression de la colonne CA équivaut donc à 1 atmosphère. En y ajoutant la pression atmosphérique qui s'exerce en A, au sommet de la colonne, on voit qu'au moment où le volume de l'air a été réduit de moitié, la pression est double de ce qu'elle était d'abord : ce qui démontre la loi.

Fig. 177.

Fig. 178.

De même, si l'on verse du mercure jusqu'à réduire la masse d'air au tiers de son volume initial, on constate que la distance verticale des deux niveaux devient égale à deux fois la hauteur barométrique. Cette colonne de mercure équivaut donc à deux pressions atmosphériques, qui, s'ajoutant à celle qui s'exerce directement sur le mercure de la grande branche, font une pression totale de 3 atmosphères. C'est donc sous une pression triple que le volume d'air est devenu trois fois moindre.

2° *Cas des pressions inférieures à une atmosphère. — Cuvette profonde.* — On se sert : 1° d'un tube de Torricelli, aussi bien calibré que possible et divisé en parties d'égale longueur ; 2° d'une *cuvette profonde*, c'est-à-dire d'une cuvette en verre, telle que P, dont le fond est formé par un long et large tube en fer M (fig. 177).

On remplit le tube de mercure environ jusqu'aux deux tiers et on laisse le reste plein d'air; puis on le retourne et on plonge dans la cuvette profonde, qui a été préalablement remplie de mercure. Enfonçant ensuite le tube jusqu'à ce que le mercure soit au même niveau à l'intérieur et à l'extérieur (fig. 177), on lit sur le tube quel est le volume occupé par l'air. On tient alors, enfermée dans le tube, une masse *d'air de volume* connu, à la pression atmosphérique du moment. *Puis on soulève le* tube (fig. 178), jusqu'à ce que, par suite de

la diminution de pression, le volume final de l'air AC devienne double du volume initial AB. Or on voit alors le mercure monter dans la tube et y atteindre une hauteur CD, qu'on trouve égale à la moitié de la hauteur barométrique. L'air, dont le volume a doublé, n'est donc plus qu'à une demi-pression atmosphérique; car c'est la force élastique de cet air qui, jointe au poids de la colonne CD, fait équilibre à la pression atmosphérique extérieure.

De même, on peut soulever le tube jusqu'à ce que le volume de l'air ait exactement triplé : à ce moment on constate que la colonne de mercure soulevée est égale aux 2/3 de la hauteur barométrique, et comme le poids du mercure soulevé, augmenté de la force élastique du gaz, fait équilibre à la pression atmosphérique, il en résulte que cette force élastique équivaut à 1/3 d'atmosphère.

169. **Expressions analytiques de la loi de Mariotte.** — 1° Si V_0 et V_1 sont les volumes sous les pressions P_0 et P_1, la loi qui vient d'être trouvée est évidemment exprimée par la relation

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{P_1}{P_0} \quad \text{ou bien} \quad \frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} = 1.$$

2° Ces relations peuvent encore s'écrire :

$$P_0 V_0 = P_1 V_1.$$

En désignant par $V_0, V_1, V_2, V_3 \ldots$ les volumes sous les pressions $P_0, P_2, P_3, P \ldots$, on a

$$P_0 V_0 = P_1 V_1 = P_2 V_2 = P_3 V_3 = \ldots,$$

ce qui peut s'énoncer ainsi : *Le produit du volume par la pression est un nombre constant.*

3° Enfin, sous ces diverses pressions le poids p du gaz ne changeant évidemment pas, on aura, en désignant par $D_0, D_1, D_2, D_3 \ldots$ les poids spécifiques correspondants

$$p = V_0 D_0 = V_1 D_1 = V_2 D_2 = \ldots,$$

par suite

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{D_1}{D_0}$$

et comme $\frac{V_0}{V_1} = \frac{P_1}{P_0}$, on aura

$$\frac{D_1}{D_0} = \frac{P_1}{P_0}.$$

On obtient ainsi ce troisième énoncé de la loi de Mariotte : *Les poids spécifiques d'une masse donnée de gaz sont, à température constante, proportionnels aux pressions qu'elle supporte.*

170. **Étude critique de la loi de Mariotte. — Expériences antérieures à celles de Regnault.** — *Après Mariotte et Boyle, la compressibilité des gaz fut étudiée par un grand nombre de physiciens. La plupart des recherches antérieures*

celles de Regnault n'offrent plus aujourd'hui qu'un intérêt purement historique; nous ne ferons donc que les indiquer.

Après les expériences contradictoires de Muschenbroek, Sulzer et Robinson, Œrsted et Swendsen montrèrent, en 1826, que l'acide sulfureux est plus compressible que l'air; Despretz confirma ce résultat et l'étendit au gaz cyanogène, à l'ammoniaque et à l'acide sulfhydrique; plus tard, Pouillet, opérant jusqu'à 100 atmosphères, confirma ces conclusions, les étendit à l'acide carbonique et trouva que, dans ces limites de pression, l'azote, l'hydrogène et l'oxyde de carbone se compriment sensiblement comme l'air : sa méthode était purement comparative.

Enfin, Dulong et Arago installèrent dans la tour du Lycée Henri IV un appareil au moyen duquel ils expérimentèrent sur l'air jusqu'à 27 atmosphères: ils trouvèrent que, dans ces limites de pression, l'air suit la loi de Mariotte à des différences près qu'ils crurent pouvoir attribuer à des erreurs d'observation, quoiqu'elles fussent *toutes* dans le sens d'une compressibilité plus grande que celle exigée par la loi de Mariotte.

171. **Expériences de Regnault.** — Regnault publia, en 1847, des expériences sur la compressibilité des gaz qui firent époque dans la science. Son appareil, qui avait beaucoup de rapports avec celui de Dulong et Arago, présentait de nombreux perfectionnements de détail; sa méthode permettait de se mettre à l'abri ou de tenir compte de toutes les causes d'erreur inhérentes aux méthodes des précédents expérimentateurs.

1° *Appareil.* — La figure 179 représente l'ensemble de l'appareil de Regnault et quelques-uns de ses détails les plus importants.

Les tubes A et B sont juxtaposés parallèlement et en dehors de la pompe à mercure H. Un robinet en fonte R est interposé entre les tubes et le réservoir, de manière à mettre les deux colonnes de mercure à l'abri des fuites qui pourraient se produire dans la pompe pendant la durée d'une observation.

Le tube manométrique B est en cristal et il a 3 mètres de longueur; il a été jaugé et divisé en millimètres; il porte un trait de repère qui le partage en deux parties d'égale capacité. Il est fermé à sa partie supérieure par un robinet *p* en acier, par où on peut le remplir d'un gaz quelconque, à une pression déterminée. Ce gaz est conservé dans un réservoir V, maintenu par un bain d'eau courante à une température constante; on l'y a comprimé à l'aide de la machine de compression P.

La pression est mesurée à l'aide d'une colonne A de huit tubes en cristal, égaux chacun au tube B, parfaitement équilibrée comme dans l'appareil de Dulong. L'assemblage des tubes se fait par un système de raccord extrêmement simple, appelé par Regnault *collier à gorge*. Les extrémités des tubes, en regard, sont mastiquées chacune dans une tubulure en fer à base conique; une rondelle en cuir est interposée entre les deux bases des cônes en contact. Elles sont embrassées et serrées par le collier, qui est creusé intérieurement en forme de gorge biconique, d'une ouverture un peu plus aiguë que celle des bases des tubes. Ce collier est formé de deux parties articulées autour d'une charnière, et pouvant être rapprochées ou écartées à l'aide d'une vis. En serrant la vis, on exerce une pression considérable et l'on obtient une fermeture hermétique.

2° *Méthode.* — Elle était essentiellement distincte de celle de Dulong et Arago. Ceux-ci, en effet, opéraient de la même manière que l'abbé Mariotte, c'est-à-dire qu'ils réduisaient de plus en plus le volume occupé par une même masse de gaz. Or les erreurs de mesure qu'ils commettaient à chaque observation du volume réduit, étaient sensiblement constantes. Supposons que leur somme fût égale à un 1/2 centimètre : elle atteignait à peine $\frac{1}{400}$ du *volume initial, lequel* était de 2 mètres; *c'était une erreur négligeable.* Mais *lorsque, pour une pression* environ 20 fois plus grande, le volume était réduit

à $\frac{1}{20}$ de 2 mètres, la même erreur représentait $\frac{1}{20}$ du volume gazeux; *elle atteignait donc l'ordre de grandeur des divergences qu'on pouvait soupçonner entre la loi de Mariotte et la loi de compressibilité.*

Regnault fit disparaître cette cause d'erreur croissante en opérant, non plus sur une même masse de gaz, mais sur des masses de gaz variables, dont les volumes étaient successivement réduits dans un rapport constant, d'environ 2 à 1. On remplissait d'abord le volume total V_0 du manomètre avec une certaine masse de gaz à la pression P_0; puis on comprimait le gaz à l'aide de la pompe à mercure, jusqu'à réduire son volume à V_1 (V_1 = environ $\frac{1}{2}$ V_0), et l'on mesurait la pression finale P_1, fournie par la distance verticale des deux niveaux de mercure. Cela constituait une première série de mesures. — On en faisait une deuxième en remplissant de nouveau le volume V_0 avec une autre masse du même gaz, à la pression P'_0; on réduisait le volume à V_1 (ou V'_1, peu différent de V_1), et l'on mesurait une pression finale P'_1, et ainsi de suite. En opérant ainsi toujours sur les mêmes volumes V_0 et $\frac{1}{2}$ V_0 assez considérables, l'erreur absolue était très petite, et l'erreur relative était constante; *la sensibilité de la méthode n'allait donc pas en diminuant.*

3° *Corrections.* — La précision de la méthode fut encore augmentée par un certain nombre de corrections qu'on fit subir aux résultats bruts des mesures.

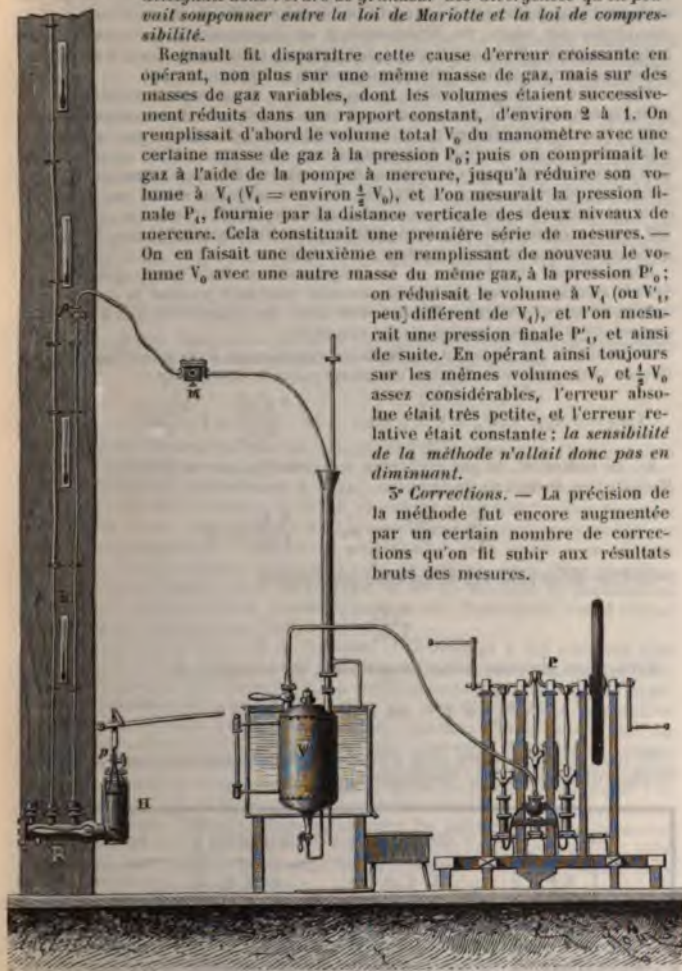


Fig. 179.

Correction barométrique. — *La pression atmosphérique*, au moment de *chaque expérience, était lue à un baromètre placé* au bas de la tour. Soit H

cette lecture (supposée réduite à zero); or c'est la pression au sommet de la colonne mercurielle dans le long tube qu'il faudrait évaluer : elle serait évidemment plus petite que H, et égale par exemple à $H - h$. On commettait donc une erreur par excès. On déterminait h en appliquant la formule barométrique simplifiée. Pour une hauteur de la colonne mercurielle égale à 22 mètres, et une pression H égale à 760 mm, on avait $h = 2{,}092$ mm.

Correction de compressibilité. — Le mercure étant sensiblement compressible, la densité n'était pas constante sur toute la longueur de la colonne mercurielle; les couches inférieures étaient sensiblement plus denses que les couches supérieures. Il en résultait évidemment une erreur par défaut dans l'évaluation de la pression d'après la hauteur de la colonne. Regnault transformait donc la hauteur observée en ce qu'elle eût été si le mercure n'était pas compressible et conservait partout sa densité normale, à 0° et sous la pression de 760 mm. La correction était donc positive; elle était très petite, car elle n'atteignait pas 1,2 mm pour une hauteur totale de 22 m.

Correction de température. — La température de l'eau froide qui circulait dans le manchon n'était pas rigoureusement constante pendant la durée d'une même série d'expériences. On ramenait donc les volumes du gaz à ce qu'ils eussent été si la température eût été constante.

4° *Résultats.* — Si la loi de Mariotte *s'appliquait à un gaz déterminé*, on devrait avoir pour toute la série des mesures qui le concernent :

$$V_0 P_0 = V_1 P_1, \quad V'_0 P'_0 = V'_1 P'_1, \text{ etc.}, \qquad \text{ou} \qquad \frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} = 1 = \frac{V'_0 P'_0}{V'_1 P'_1} = \ldots \text{ etc.}$$

Si, au contraire, le gaz était *plus compressible* que ne l'indique la loi de Mariotte, on devrait avoir

$$\frac{V_0}{V_1} > \frac{P_1}{P_0} \qquad \text{ou} \qquad \frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} > 1,$$

inégalités qu'on peut exprimer aussi par l'égalité

$$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} = 1 + \varepsilon.$$

Enfin, si le gaz était *moins compressible*, on devrait avoir

$$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} < 1, \qquad \text{ou bien} \qquad \frac{V_0 P_0}{V_1 V_1} = 1 - \varepsilon.$$

Or voici le tableau d'une série d'expériences faites sur l'air, sur l'azote, sur l'acide carbonique et sur l'hydrogène :

AIR		AZOTE		ACIDE CARBONIQUE		HYDROGÈNE	
P_0	$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1}$	P_0	$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1}$	P_0	$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1}$	P_0	$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1}$
mm		mm		mm		mm	
758,72	1,001414	755,46	1,000988	764,05	1,007597	»	»
2112,55	1,002765	4955,92	1,002952	5186,15	1,028698	2211,18	0,998584
4140,82	1,005255	8628,54	1,004768	4879,77	1,045625	5845,18	0,996121
9556,41	1,006566	10981,42	1,006456	9619,97	1,155865	9176,50	0,992955

La comparaison de ces nombres a conduit Regnault aux conclusions suivantes :

1° Pour aucun de ces quatre gaz le rapport $\frac{V_0 P_0}{V_t P_t}$ n'est égal à 1 : *aucun d'eux n'obéit donc rigoureusement à la loi de Mariotte.* La différence restant très faible, la divergence entre la loi de Mariotte et la véritable loi de compressibilité n'est pas très grande. Elle est négligeable pour de faibles pressions; elle s'accuse davantage à mesure que la pression du gaz augmente.

2° ε est positif pour l'air, l'azote et l'acide carbonique : donc *ces trois gaz sont plus compressibles que ne l'indique la loi de Mariotte.* Pour l'hydrogène ε est négatif : *donc ce gaz est moins compressible*; mais la divergence diminue quand la pression augmente, contrairement à ce qui a lieu pour les autres gaz.

3° Tous les autres gaz étudiés par Regnault se comportent comme l'air. Ils sont plus compressibles que ne l'indique la loi de Mariotte. La divergence est beaucoup plus grande pour les gaz liquéfiables, tels que l'acide carbonique, l'acide sulfureux, le gaz ammoniac, le cyanogène, que pour les gaz anciennement appelés *permanents.*

4° L'équation simple $\frac{V_0 P_0}{V_t P_t} = 1$, qui exprime la loi de Mariotte, ne s'applique donc à aucun gaz. Regnault a déduit de ces expériences une formule empirique représentant la loi de compressibilité de quelques gaz. Elle est

$$\frac{V_0 P_0}{VP} = 1 \pm A\left(\frac{V_0}{V} - 1\right) \pm B\left(\frac{V_0}{V} - 1\right)^2 :$$

A et B sont des constantes dont les valeurs sont *différentes pour chaque gaz* et sont pour tous *extrêmement petites.*

172. **Expériences postérieures à celles de Regnault.** — 1° *Expériences de Natterer.* — En 1851, Natterer, à Vienne, cherchant à liquéfier les gaz dits alors *permanents*, avait opéré jusqu'à 2700 atmosphères. Quoique ses procédés ne fussent pas susceptibles d'une grande précision, il était arrivé à ce résultat important : l'air, l'oxygène, l'azote et l'oxyde de carbone, après s'être *plus* comprimés (d'après Regnault) que ne l'indique la loi de Mariotte, se conduisaient au contraire, sous de fortes pressions, comme fait l'hydrogène, c'est-à-dire se comprimaient *moins* que ne l'indique la loi.

2° *Premières expériences de M. Cailletet.* — Ce résultat a été confirmé plus tard, en 1870, par M. Cailletet, dans une série d'expériences où la pression avait été poussée jusqu'à 700 atmosphères. La méthode consistait à comprimer le gaz dans un piézomètre de verre renfermé dans un tube d'acier (tube laboratoire) contenant du mercure qui, pendant la compression, s'élevait dans la tige du piézomètre; celle-ci avait été préalablement recouverte d'une légère couche d'or que le mercure dissolvait en montant : on jugeait ainsi du volume occupé par le gaz pendant la compression d'après le point de la tige jusqu'auquel l'or avait été dissous par le mercure. Les pressions étaient mesurées au moyen d'un manomètre genre Desgoffe. Malheureusement les indications fournies par cet instrument, tel qu'on le construisait alors, laissaient beaucoup à désirer; pour faire cesser cette incertitude, le plus sûr était d'opérer avec des manomètres à air libre d'une très grande hauteur : c'est dans ce but qu'ont été entreprises d'autres expériences, celles de M. Cailletet et celles de M. Amagat.

3° *Autres expériences de M. Cailletet.* — Les expériences de M. Cailletet (1879) ont été faites au puits artésien de la Butte-aux-Cailles. Le procédé de lecture des volumes est celui de la tige dorée (comme ci-dessus). Le tube-laboratoire était vissé à l'extrémité d'un long tube d'acier étiré, flexible, enroulé sur une sorte de treuil placé à l'orifice du puits, rempli de mercure et terminé en haut par un réservoir rempli de ce liquide; *on faisait descendre* le tube-laboratoire dans le puits *en déroulant le tube d'acier : on obtenait* ainsi une colonne verti-

cale de mercure de longueur variable et connue; il fallait pour chaque lecture remonter le tube-laboratoire et en retirer le piézomètre, afin de voir à quelle hauteur le mercure était monté dans la tige dorée. On a opéré ainsi jusqu'à une profondeur de 182 mètres, soit 240 atmosphères. La profondeur totale du puits était de 500 mètres. Ces essais ont été faits avec l'azote : on a retrouvé le maximum du produit PV sous une pression d'à peu près 80 atmosphères.

4° *Expériences de M. Amagat* (1879). — Les expériences de M. Amagat ont été faites dans un puits de mine (puits Verpilleux) près Saint-Étienne. La méthode suivie est pour ainsi dire *l'inverse* de celle qui précède.

L'appareil (fig. 180) était installé dans une galerie, à 327 mètres au-dessous du sol. Une pompe SS'P refoulait (par l'intermédiaire d'eau mélangée de glycérine) le mercure R, placé dans le réservoir sur lequel elle est montée, d'une part dans le piézomètre A, contenant le gaz qu'on voit à gauche, d'autre part dans un tube d'acier dont on voit seulement la naissance CO : ce tube, composé de tronçons réunis par des raccords à écrous dont le premier, TT', est figuré, était fixé aux parois du puits dans toute sa longueur; la lecture des volumes se faisait donc directement sur la tige graduée du piézomètre, comme dans les expériences de Biot et Arago ou dans celles de Regnault. Pour mesurer la hauteur de la colonne de mercure, des aides s'élevaient dans la benne du puits successivement jusqu'à chaque raccord *d*, le défaisaient et vissaient à la place de l'écrou supérieur une pièce portant un tube de verre *b*; on pompait alors jusqu'à ce que le mercure arrivât dans ce tube; l'équilibre de température étant établi et la lecture du volume faite, l'aide refaisait le joint, montait à la station suivante, et ainsi de suite. La température de la colonne était donnée par une série de thermomètres échelonnés à chaque raccord, celle du gaz par le thermomètre du manchon MM entourant la tige graduée et que traversait continuellement un courant d'eau. Pour les pressions inférieures à 80 atmosphères, les expériences ont été faites en suivant la même méthode dans l'une des tours de l'église de Fourvière à Lyon. L'ensemble des résultats est donné dans le tableau suivant :

P	PV	P	PV	P	PV	P	PV
atm.		atm.		atm.		atm.	
1,00	1,0000	65,80	0,9897	168,80	1,0295	500	1,3768
26,32	0,9950	72,57	0,9902	208,65	1,0557	1000	2,0160
32,90	0,9919	78,95	0,9908	251,15	1,0875	1500	2,6258
39,47	0,9908	85,55	0,9915	290,95	1,1254	2000	3,2095
46,05	0,9899	90,97	0,9929	332,04	1,1668	2500	3,7708
52,63	0,9896	109,17	0,9975	373,50	1,2110	3000	4,3158
59,21	0,9895	126,90	1,0248	430,77	1,2740	—	—

Ces résultats (dans les limites communes de pression) diffèrent notablement de ceux obtenus par M. Cailletet.

La compressibilité de l'azote étant connue, M. Amagat a pu étudier au laboratoire, par comparaison, celle de divers autres gaz : hydrogène, oxygène, air, oxyde de carbone, formène, éthylène, acide carbonique; tous ces gaz ont à la température ambiante (sauf les deux derniers qui se liquéfient, l'éthylène au-dessous de 10°) un minimum du produit PV, à l'exception de l'hydrogène, pour lequel ce produit va toujours en croissant. Le tableau supplémentaire qui donne pour l'azote la suite de ces produits jusqu'à 3000 atmosphères est tiré *d'un autre travail de* M. Amagat. On voit que, sous cette pression, le produit PV

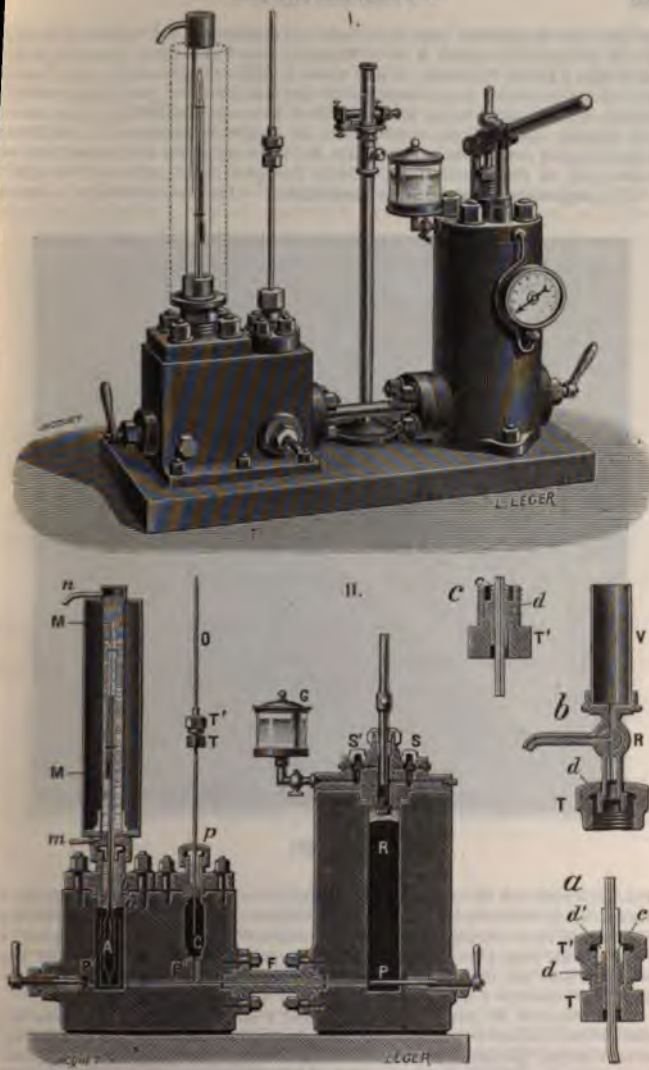


Fig. 180.
Appareil Amagat. — I, perspective ; II, coupe et détails.

(et par suite la pression pour le volume correspondant) est quatre fois plus grand que si le gaz suivait la loi de Mariotte; pour l'hydrogène il serait seulement égal à 2,8754. Par suite, ce gaz, d'abord moins compressible que l'azote, devient au contraire plus compressible que lui sous des pressions considérables; à 3000 atmosphères, les coefficients de compressibilité des gaz, azote, air, oxygène, sont très peu différents et de l'ordre de grandeur de ceux des liquides; sous cette pression, la densité de l'azote rapportée à celle de l'eau est 0,859, celle de l'hydrogène 0,090, celle de l'oxygène 1,128, celle de l'air 0,897.

175. **Compressibilité aux diverses températures.** — Les expériences qui viennent

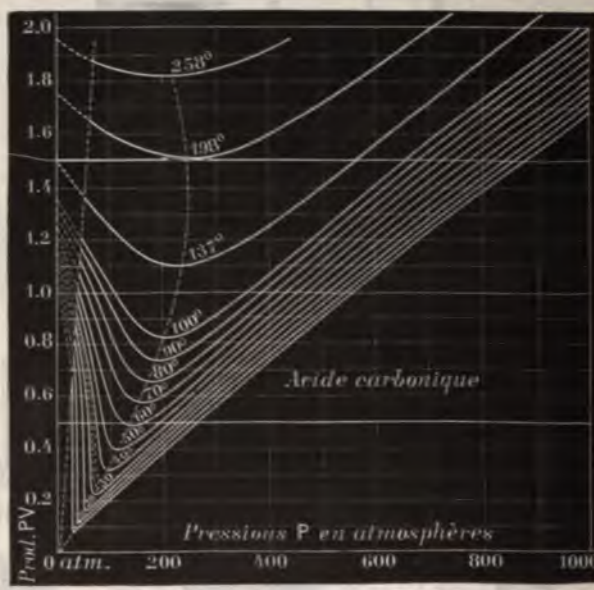


Fig. 181.

d'être décrites ont été faites à la température ambiante; dès 1869 Andrews étudia l'acide carbonique à diverses températures comprises entre 10° et 50°. Ces expériences ayant surtout pour objet la continuité du passage de l'état liquide à l'état gazeux, nous y reviendrons à propos du point critique; du reste elles ont été faites dans des limites de pression et de température trop restreintes pour montrer l'ensemble des lois de la compressibilité proprement dite.

Expériences de M. Amagat. — M. Amagat a entrepris cette étude dans des limites très étendues de pression et de température. Il a suivi dans ces recherches, suivant les cas, plusieurs méthodes dont la description entraînerait trop loin. Les pressions, qui ont été poussées jusqu'à 3000 atmosphères, ont été mesurées au moyen d'un manomètre à pistons différentiels libres, fondé sur le même principe que celui dit de Desgoffe et qui sera décrit plus loin.

Nous prendrons comme type l'acide carbonique; le diagramme ci-contre (fig. 181) montre les courbes de compressibilité à diverses températures, ou *lignes isothermes* entre 0 et 260° et jusqu'à 1000 atmosphères; elles sont construites en portant les pressions sur l'axe des abscisses et sur les ordonnées les valeurs correspondantes du produit PV. Ces courbes seraient donc des droites parallèles à l'axe de pression si le gaz suivait la loi de Mariotte; elles se rapportent toutes à la même masse de gaz, celle qui occuperait un volume égal à l'unité à 0° et sous la pression de 1 atm. : d'où il résulte que le diagramme fournit en même temps toutes les données nécessaires pour le calcul des coefficients de dilatation à pression constante et à volume constant dans les limite

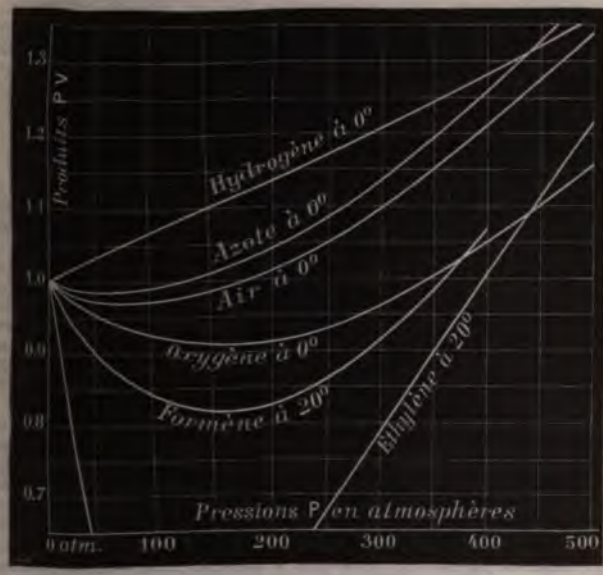


Fig. 182.

de pression et de température qu'il comporte. On voit qu'au-dessous de 31° les isothermes présentent une partie rectiligne verticale qui correspond à la liquéfaction; immédiatement après cette température (température critique), elles présentent un point d'inflexion, puis un minimum d'abord extrêmement prononcé de l'ordonnée PV; la température croissant, la courbure des isothermes va en s'affaiblissant et en même temps l'abscisse correspondante à l'ordonnée minima croît, passe par un maximum, puis rétrograde en formant le lieu tracé en ponctué. Si on rapproche de ces résultats ce fait que les isothermes sont pour l'hydrogène, dès la température ordinaire, des lignes présentant à l'axe des abscisses une concavité à peine sensible et dépourvue de minimum de l'ordonnée, puisque pour ce gaz PV va toujours en croissant, on conclura que pour tous les autres gaz il en serait de même à une *température suffisamment* élevée. L'hydrogène forme

donc comme un type extrême dont les autres gaz, même à 200° et 300°, sont encore fort éloignés. L'acide carbonique et l'éthylène, dont le réseau est très analogue à celui de l'acide carbonique, forment le type extrême opposé; l'azote, l'air, l'oxygène, le formène forment les échelons intermédiaires. [C'est ce qui ressort aussi du diagramme (fig. 182), qui montre pour des températures voisines de 15° et jusque vers 400 atmosphères, une isotherme de chacun de ces gaz; l'hydrogène et l'éthylène sont ici les types extrêmes.]

On voit qu'à droite du lieu des ordonnées minima les isothermes se transforment rapidement en lignes presque droites. M. Amagat avait d'abord pensé que, sous des pressions suffisamment fortes, ces lignes se transformeraient en un faisceau de droites dont le coefficient angulaire serait caractéristique pour chaque fluide; mais il a montré depuis que pour tous les gaz, même jusqu'à 3000 atmosphères, il subsiste une légère concavité tournée vers l'axe des pressions. Si sous une pression ou à une température suffisante cette courbure finissait par disparaître pour tendre vers une direction limite, dans ces conditions l'équation d'une isotherme, dans sa partie rectiligne, serait de la forme

$$PV = ap + b, \quad \text{d'où} \quad (V - a) = \frac{b}{p}.$$

On aurait donc $V = a$ pour une pression infinie; a serait le volume limite, ce qu'on a souvent appelé le *covolume*; ce coefficient serait un élément fondamental de la théorie des gaz, mais pour le moment on ne peut que faire une hypothèse à ce sujet.

Quoi qu'il en soit, on ne peut pas dire qu'en élevant la température l'état du gaz tende vers celui caractérisé par la loi de Mariotte, car il faudrait pour cela que les isothermes devinssent parallèles à l'axe des pressions; tout ce qu'on peut dire, c'est que l'écart entre deux pressions données va en diminuant, pour cette raison que, les valeurs des deux produits PV augmentant continuellement avec la température, leur quotient se rapproche de l'unité, parce que leur différence n'augmente point ou tout au moins ne varie que d'une façon relativement insignifiante.

174. **Compressibilité sous des pressions extrêmement faibles.** — Ce sujet a été étudié par M. Siljerstrôm, M. Mendelejef et M. Amagat. Les résultats obtenus sont contradictoires. D'après M. Amagat, qui a repris deux fois la question et qui a opéré jusque sous une raréfaction de quelques dixièmes de millimètre, l'air, l'hydrogène et l'acide carbonique raréfiés suivraient sensiblement la loi de Mariotte, c'est-à-dire que les écarts trouvés sont de l'ordre de grandeur des erreurs dont il est impossible de répondre, dans ces recherches où la mesure des pressions en particulier, précisément à cause de leur extrême petitesse, présente de grandes difficultés.

MANOMÈTRES.

175. **Définitions.** — Dans les expériences qui précèdent, les pressions étaient mesurées au moyen d'une colonne de mercure; ce dispositif devient peu pratique pour de fortes pressions : il suffit de rappeler l'appareil de Regnault, atteignant 27 atmosphères, et celui de M. Amagat, dans lequel, pour obtenir une *pression de 450 atmosphères*, il a fallu donner à la colonne une *hauteur verticale de 527 mètres*. On a donc cherché à résoudre

la question au moyen d'instruments spéciaux d'un usage plus commode, qu'on appelle *manomètres*[1].

On construit trois sortes de manomètres, d'après trois principes distincts :

1° Les *manomètres à air libre*, dans lesquels la force élastique à mesurer est équilibrée directement par une colonne de mercure ou d'un autre liquide, qui s'élève plus ou moins haut dans un tube ouvert. Ce type correspond précisément à la colonne de mercure des appareils dont il vient d'être question pour l'étude de la compressibilité des gaz. Ce sont les manomètres les plus exacts : c'est à leur indication qu'il convient de comparer celles des autres types de manomètres, toutes les fois que cela est possible.

2° Les *manomètres à air comprimé*, dans lesquels la force élastique à mesurer est équilibrée par celle d'une masse d'air comprimée en vase clos et prise pour terme de comparaison.

3° Les *manomètres métalliques*, dans lesquels la force élastique à mesurer est équilibrée par l'élasticité d'un ressort circulaire qui s'enroule ou se déroule plus ou moins, comme celui du baromètre de Bourdon.

L'unité de mesure ordinaire pour les pressions ou tensions des gaz est l'*atmosphère*, telle que nous l'avons définie ci-dessus. On a vu (145) que cette pression est égale à 1,033 kg par centimètre carré ; par conséquent, si l'on dit d'un gaz qu'il a une tension de 2 ou 3 atmosphères, cela signifie qu'il exerce sur chaque centimètre carré des parois de son récipient une pression égale à 2 ou 3 fois 1,033 kg.

Fig. 183.

176. **Manomètre à air libre ordinaire.** — *Description.* — Cet instrument consiste en un tube de cristal ouvert, communiquant librement avec l'atmosphère par son bout supérieur et soudé par l'autre à la partie inférieure d'un réservoir A, à grand diamètre. Celui-ci est mis en communication, par un tube C plus étroit, avec le récipient fermé qui contient le gaz ou la vapeur dont on veut mesurer la tension. Le

1. De μανός, rare, peu dense, et μέτρον, mesure.

réservoir A est rempli de mercure, et le tout est fixé sur une longue planchette qu'on installe verticalement. Tantôt le réservoir A est un cylindre de verre (fig. 183), qui fait suite au tube droit, comme le réservoir d'un baromètre à siphon ; tantôt c'est une cuvette en fonte, à moitié pleine de mercure (fig. 184), dans lequel le tube manométrique *b* plonge directement, comme le tube d'un baromètre ordinaire ; le gaz ou la vapeur pénètre alors par un ajutage *a*, et vient exercer sa pression à la surface libre du mercure.

Graduation. — Pour graduer le manomètre, on

Fig. 184.

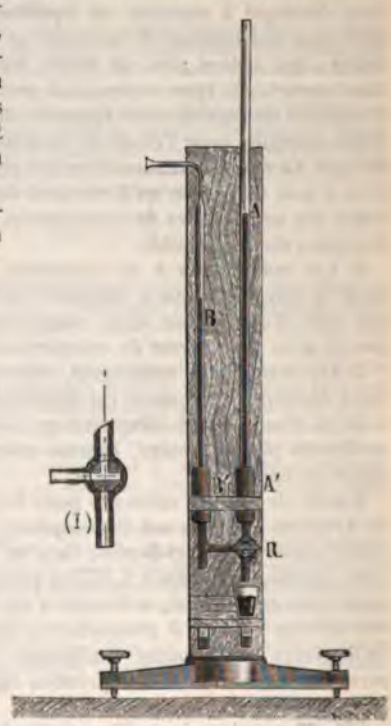


Fig. 185.

laisse l'orifice C communiquer avec l'atmosphère, et, au niveau où le mercure s'arrête alors dans le tube de cristal, on marque le chiffre 1, qui indique 1 atmosphère ; puis à partir de ce point, de 76 en 76 centimètres, on marque les chiffres 2, 3, 4, 5, 6, qui indiquent 2, 3, 4,... atmosphères. On partage enfin chacun des intervalles de 1 à 2, de 2 à 3..., à droite du tube, en 10 parties égales, qui donnent les dixièmes d'atmosphère. Les nom-

bres à gauche donnent les pressions en centimètres de mercure.

Remarque. — On voit qu'on néglige complètement les variations du niveau dans la cuvette. Ce n'est donc pas *un instrument de précision* comme le baromètre.

177. **Petit manomètre à air libre.** — Un autre modèle de manomètre à air libre a servi à Regnault pour les pressions qui ne dépassent pas 3 atmosphères. Il se compose de deux larges tubes en verre, A et B (fig. 185), mastiqués dans les branches A′ et B′ d'une pièce en fonte, deux fois recourbée à angle droit, creusée d'un canal intérieur et munie d'un robinet R à trois voies. L'ensemble forme donc un système de vases communicants dans lesquels on peut verser du mercure. Le grand tube est ouvert librement à l'air; le tube court, B, peut se relier, à l'aide d'un collier à gorge, avec le récipient à gaz où l'on veut mesurer la pression. Quand cette communication est établie, le robinet étant dans la position normale (figurée en I), la pression du gaz se transmet au mercure de la grande branche : le niveau monte en A, tandis qu'il baisse en B; la différence de ces niveaux, h_0 (réduite à 0°), augmentée de la hauteur barométrique actuelle (également réduite à 0°), mesure exactement la force élastique du gaz. On a

$$F = h_0 + H_0.$$

On détermine h_0 soit à l'aide d'échelles en millimètres tracées sur les tubes mêmes, soit, pour plus de précision, par des lectures au cathétomètre.

Tout l'appareil est fixé sur une planchette verticale, qui est posée sur un pied à vis calantes.

178. **Manomètre barométrique** ou **baromètre différentiel de Regnault** (*Modèle de M. A. Leduc*). — Pour les faibles tensions, Regnault avait adopté un manomètre qui est une modification de son baromètre normal. Voici le modèle de cet instrument, qui est employé par M. A. Leduc au laboratoire de la Sorbonne.

A côté du tube barométrique proprement dit B, muni d'un siphon S, comme le baromètre normal de M. A. Leduc (151), est fixé un second tube M d'égal diamètre et également terminé par une pointe fine qui plonge dans la même cuvette (fig. 186). Ce tube manométrique est en communication à sa partie supérieure avec une tubulure à robinet par où il est mis en rapport avec le récipient qui contient le gaz à faible tension. Plus la raréfaction est poussée loin dans celui-ci, plus le mercure s'élève dans le tube *a*, et c'est la différence de niveau dans les tubes *b* et *a* qui fait connaître la *tension : on la mesure au* cathétomètre. La

lecture est facilitée par l'emploi de curseurs tels que C, munis d'un viseur spécial (bande noire entre deux bandes blanches) qu'on amène derrière le niveau mercuriel, et par une lampe à incandescence qui éclaire le viseur.

Fig. 186.

179. **Grand manomètre à air libre de la tour Eiffel.** — M. Cailletet a récemment installé dans la tour Eiffel un grand manomètre à air libre, analogue à celui de M. Amagat (172, 4). Il peut mesurer directement jusqu'à 400 atmosphères.

Il est constitué par un tube d'acier d'environ 4,5 mm de diamètre qui, partant du pilier Ouest de la tour, monte jusqu'à la 1re plate-forme le long du plan incliné de l'un des rails de l'ascenseur. Entre la 1re et la 2e plate-forme le tube est appuyé contre l'escalier hélicoïdal; c'est également l'escalier vertical en hélice qui lui sert d'appui, de la 2e plate-forme jusqu'au sommet.

Des tubes de verre, longs de plusieurs mètres, sont disposés de 3 mètres en 3 mètres. Ils communiquent avec le tube d'acier par l'intermédiaire de robinets coniques à vis.

On fait monter le mercure dans le manomètre par compression d'eau. Le récipient à mercure et la pompe qui servent à cet usage sont installés dans un laboratoire du pilier Ouest. En cette station même on a disposé un manomètre métallique, gradué en atmosphères et portant les numéros d'ordre des tubes successifs, qui indique à chaque instant à quel tube de verre latéral a atteint le niveau du mercure. Alors on n'a qu'à ouvrir le robinet correspondant qui met en communication le tube d'acier avec le tube en verre, pour pouvoir relever, à la lunette, sur une règle en bois verni, la hauteur manométrique.

180. **Manomètres à liquides moins denses que le mercure.** — Pour la mesure *des faibles pressions* il y a intérêt à substituer au mercure, dans les manomètres *à air libre*, un liquide moins dense, pourvu que ce liquide n'émette pas

de vapeurs sensibles à la température ordinaire. En prenant l'acide sulfurique, qui satisfait à ces conditions et qui est environ 7 fois 1/2 moins dense que le mercure, une variation de pression sera accusée par une colonne liquide 7 fois 1/2 plus haute que le mercure : on aura un instrument *sept fois et demie plus sensible* que le manomètre ordinaire, ou qui permettra d'évaluer, *avec une égale précision*, des pressions *sept fois et demie moins fortes*.

Avec un manomètre à eau, on aurait une sensibilité 13 fois 1/2 plus grande.

181. Manomètre dit de Desgoffe. — Cet instrument, imaginé par Galli-Cajalat, est une application du principe de Pascal, au même titre que la *presse hydraulique*, mais en quelque sorte *en sens inverse*.

Principe. — Soit P la valeur, par centimètre carré, de la pression à mesurer. Au lieu de faire agir directement cette pression sur le niveau mercuriel dans la cuvette, on la fait agir sur la face supérieure *a* d'un piston plein dont la face inférieure A repose elle-même sur le mercure (fig. 187). Or, tandis que la section *s* de la tête du piston est très petite, la section S de sa base est très large; il en résulte que la pression transmise au mercure, par unité de surface, ne sera plus qu'une fraction de P, égale à $P\frac{s}{S}$. Si donc la colonne de mercure nécessaire pour faire équilibre à P eût été H, la colonne qui fera équilibre à la pression $P\frac{s}{S}$ sera $h = H\frac{s}{S}$. Si, par exemple, $S = 100\,s$, on pourra équilibrer et mesurer une pression de 500 *atmosphères* avec une colonne de mercure égale seulement à cinq fois 0,76 m, c'est-à-dire à 3,80 m.

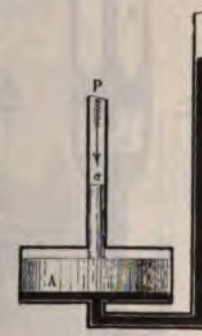


Fig. 187.

Détails de construction. — La tête du piston est un cylindre d'acier *a* qui se meut dans un cylindre de bronze, d'où il sort en traversant un cuir embouti (fig. 188); la base du piston est formée par un large disque métallique A, qui ferme complètement la courte branche du manomètre. Un disque en caoutchouc est interposé entre le disque et le mercure, dont il est séparé lui-même par une légère couche d'eau.

Le diamètre de la courte branche est tellement grand par rapport à celui de la longue branche, que lorsque le mercure s'élève jusqu'à 4,30 m dans celle-ci, il ne s'abaisse que de 1 cinquième de millimètre dans celle-là (expériences de M. Cailletet).

182. Manomètre à pistons libres et à liquides visqueux de M. Amagat. — Le manomètre de Desgoffe présente plusieurs causes d'erreurs graves : le diamètre du large piston est mal défini; la membrane subit en se déplaçant un travail dont il faudrait tenir compte; enfin, le petit piston, — qui devrait théoriquement être complètement libre, — fortement serré dans sa boîte à cuirs, se meut irrégulièrement, par soubresauts.

M. Amagat a imaginé un manomètre où il élimine toutes ces causes d'erreur par l'emploi convenable de corps visqueux. Les deux pistons (fig. 188), rodés à frottement doux dans leurs douilles métalliques, sont entièrement libres; le plus large PK repose sur une couche d'huile de ricin qui le lubrifie et est assez visqueuse pour le maintenir étanche; on obtient un résultat analogue avec le petit piston (préalablement huilé) au moyen d'une couche de mélasse placée dans une cavité *qu'on voit à sa partie supérieure en oo*. Pour éliminer complètement *l'effet d'inertie dû aux frottements*, un dispositif qu'on com*prend à la simple inspection de la figure, permet*, au moment des lectures, d'in

primer aux deux pistons un léger mouvement angulaire au moyen d'une tige d'acier *mm'* vissée dans le petit piston et entraînant le grand au moyen de deux chevilles *i*. Une pompe régulatrice R permet, en injectant une quantité convenable d'huile sous le grand piston, de maintenir celui-ci à une hauteur convenable.

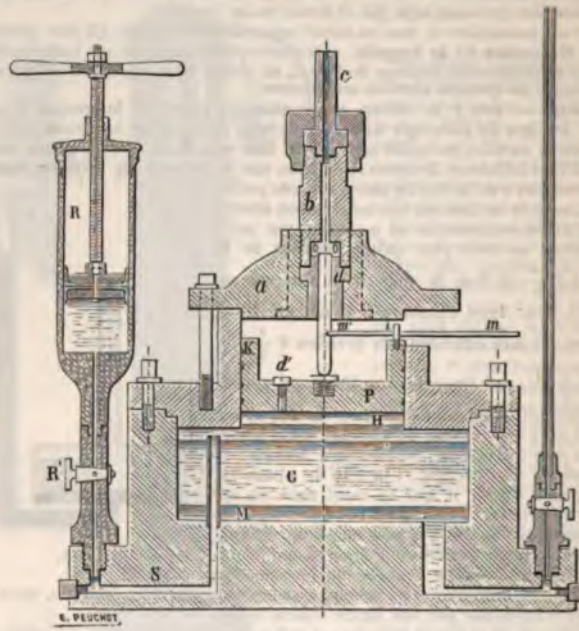


Fig. 188.

Cet appareil, bien construit, fonctionne régulièrement jusqu'à des pressions extrêmement élevées, au delà de 3000 atmosphères, dans les expériences de M. Amagat.

183. **Manomètres à air comprimé.** — Les manomètres à air comprimé sont à la fois des manomètres industriels, à cause de leurs usages, et des manomètres de précision, à cause de leur mode de graduation, qui est susceptible d'une grande exactitude. Ils se réduisent tous essentiellement à la petite branche, plus ou moins allongée, du *tube de Mariotte*.

Le tube manométrique, qui n'a ici que 60 à 80 centimètres de *longueur, est fermé* à sa partie supérieure et rempli d'air ; par *sa partie inférieure*, il plonge dans un bain de mercure. Tantôt

est contenu dans une cuvette cylindrique en fer où le nd tout droit (fig. 189) ; tantôt le mercure est sim- ntenu dans un autre tube en verre, relié au précédent urbure en forme de siphon (fig. 190). Dans le premier éservoir à mercure aut, un orifice dans solidement mastiqué nométrique, et laté- me tubulure A (fig. ù l'on établit la com- avec le gaz ou la t on doit déterminer Dans le cas du tube , la petite branche latéralement d'une robinet et à vis visser directement ipient à gaz ou à

e empiriquement ce en comparant sa celle d'un mano- libre d'une hauteur

Fig. 189.

Fig. 190.

nètres à gaz comprimés es pressions. — Dans ce luit, sauf des détails de la partie gauche de l'ap- **Amagat, abstraction faite de la colonne de mercure CC (fig. 180). ée MM est alors soigneusement jaugée ainsi que le réservoir A. ant été chargé de gaz sous une pression et à une température pressions se déduiront des volumes occupés par le fluide si sa loi bilité est connue. On emploie généralement l'air ou l'azote et on ressions des volumes au moyen des tableaux de compressibilité onnés par M. Amagat. Il faut, bien entendu, tenir compte des température.**

ces instruments est limité par la résistance des tiges calibrées rarement supporter sans rompre des pressions notablement supé- atmosphères.

nomètres métalliques. — Manomètre de Bourdon. — nètres à air comprimé ont l'inconvénient d'être beau- fragiles. Aussi est-il presque impossible de les em- *machines à vapeur mobiles*. Les manomètres indus- *lence sont les manomètres métalliques*, qui sont des

appareils sans mercure, entièrement métalliques, très portatifs, peu embarrassants et d'un prix relativement très bas.

Le premier de ces appareils est dû à Bourdon, et c'est encore le plus employé.

Principe. — Il est fondé, comme le baromètre anéroïde, sur la déformation qu'éprouvent les tubes par la pression. Lorsqu'un tube, à parois flexibles et légèrement aplaties sur elles-mêmes, est enroulé en spirale, dans le sens de son plus petit diamètre, *toute pression intérieure sur les parois a pour effet de dérouler le tube, et, au contraire, toute pression extérieure a pour effet de l'enrouler davantage.*

Fig. 191.

Description. — L'appareil se compose d'un tube de laiton long de 0,70 m, à parois minces et flexibles (fig. 191) et recourbé en hélice sur une longueur d'une spire et demie. Sa section, qui est représentée en S sur la gauche de la figure, est une ellipse dont le grand axe est de 11 millimètres et le petit de 4. L'extrémité *a*, qui est ouverte, est fixée à une tubulure à robinet *m*, destinée à mettre l'appareil en communication avec une chaudière à vapeur. L'extrémité *b* est fermée et libre, ainsi que tout le reste du tube.

Usage. — Le robinet *m* étant ouvert, la pression que la vapeur exerce sur les parois intérieures du tube le force à se dérouler. L'extrémité *b* est alors entraînée de gauche à droite, et avec elle une longue aiguille *e*, qui marque sur un cadran la tension en atmosphères.

Graduation. — Ce cadran est gradué par comparaison, soit avec un manomètre à air libre, soit avec tout autre manomètre dont les indications sont connues.

Remarque. — Ces appareils ont l'inconvénient de devenir rapidement et de plus en plus inexacts. Les pièces métalliques qui *les constituent subissent*, sous l'action des vapeurs chaudes, des

altérations dans leur élasticité, qui en faussent les indications. Il est donc indispensable d'en refaire la graduation de temps en temps.

186. Manomètres de M. Cailletet. — Dans ses expériences sur la compression

Fig. 192.

Fig. 195.

et la liquéfaction des gaz, M. Cailletet a employé des manomètres spéciaux, capables de mesurer d'assez fortes pressions avec une approximation relativement très grande. Voici l'un des types qu'il a créés.

L'appareil est constitué par un réservoir cylindrique R en verre, muni

d'une tige divisée t, et rempli d'un liquide coloré ou bien de mercure, comme un thermomètre (fig. 192). Or, si l'on soumet un récipient en verre de cette forme à des pressions croissantes, les diminutions de volume que subit le réservoir sont exactement proportionnelles aux accroissements de pression. M. Cailletet a vérifié ce fait par des expériences directes, jusqu'aux pressions indiquées par un manomètre à air libre dont la grande branche n'avait pas moins de 70 mètres de longueur. La tige du manomètre ayant été graduée par ces expériences préalables, on n'a plus qu'à l'installer dans une sorte de récipient en acier A, qui est mis en communication par une tubulure latérale a avec la presse hydraulique ou le récipient où il s'agit de mesurer la pression.

187. **Voluménomètre.** — Cet appareil, imaginé par Say, en 1797, et perfectionné par Regnault, est une ingénieuse application de la loi de Mariotte. Il a servi jadis à déterminer la densité des poudres : nous avons dit précédemment pourquoi (128, 2°). Cet usage est abandonné.

Description. — La poudre était enfermée dans un ballon B (fig. 193), qui est adapté, à l'aide d'un collier à gorge, à une garniture métallique à deux branches. L'une d'elles, t, est munie d'un robinet r qui permet de faire communiquer l'intérieur du ballon avec l'atmosphère; l'autre, t', relie le ballon, d'une manière permanente, avec le tube en verre $m\,m'$ R n, qui est une espèce de manomètre à air libre. Les branches m et n sont réunies à l'aide d'une garniture métallique, munie d'un *robinet à trois voies*.

Ce robinet, qui a été imaginé par Regnault et qui se retrouve dans tous ses appareils, est d'un usage très commode. Suivant qu'on le tourne dans l'une des positions 1, 2, 3, 4, on fait communiquer les deux branches m et n seulement entre elles, ou bien on les fait communiquer entre elles et avec l'extérieur, ou bien la branche n toute seule avec l'extérieur, ou bien la branche mn' toute seule avec l'extérieur (fig. 193, 1, 2, 3, 4).

Opération. — On se donnait le poids p de la poudre et l'on déterminait son volume u. — 1° Le corps étant introduit dans le ballon, on verse du mercure par la branche ouverte jusqu'à ce que les niveaux arrivent sur la ligne horizontale du trait de repère m'. On a alors confiné une certaine masse d'air, occupant, à la pression atmosphérique H du moment, un volume égal à $(V + v - u)$, V étant la capacité du ballon et du tube jusqu'au trait m et v la capacité du renflement mm'. — 2° On verse une nouvelle quantité de mercure jusqu'à élever le niveau en m : alors le niveau dans l'autre branche dépasse le repère m d'une hauteur h qui mesure l'excès de pression correspondant à la réduction de volume subie par la masse de gaz. Celle-ci occupe maintenant un volume $V - u$, à la pression $H + h$. En appliquant la loi de Mariotte, on a

$$[1] \qquad (V - u)(H + h) = (V + v - u)\,H.$$

C'est une équation du premier degré, d'où il est facile de tirer u, en fonction de H, h et du rapport $\frac{v}{V}$. Celui-ci se détermine en répétant la même opération *à blanc*, c'est-à-dire sans introduire de poudre dans le ballon, ce qui donne l'équation

$$V(H + h') = (V + v)\,H,$$

ou

$$[2] \qquad \left(H + h'\right) = \left(1 + \frac{v}{V}\right) H.$$

Connaissant p et u, on a immédiatement le poids spécifique D, par la formule $D = \frac{p}{u}$.

CHAPITRE IV

EXPANSIBILITÉ DES GAZ

DIFFUSION ET DISSOLUTION.

188. **Mélange des gaz** ou **Diffusion.** — 1° *Définition du phénomène.* — Par suite de leur expansibilité, les gaz mis en contact, au lieu de se séparer, comme les liquides, par ordre de densités, se mélangent d'eux-mêmes intimement, et restent indéfiniment mélangés, même quand ils n'exercent aucune action chimique réciproque. C'est en cela que consiste le phénomène de la *diffusion des gaz.*

Expériences de Berthollet. — Ce phénomène a été mis en évidence pour la première fois par le chimiste français Berthollet, à l'aide d'une expérience célèbre. Il prit deux ballons de verre (fig. 194) munis chacun d'une douille à robinet qui permettait de les visser l'un sur l'autre; il les remplit de gaz bien desséchés, l'un d'hydrogène dont la densité est 0,0692, et l'autre d'acide carbonique dont la densité est 1,529, c'est-à-dire 22 fois plus grande; enfin il les plaça, le premier au-dessus du deuxième, dans les caves de l'Observatoire, pour les préserver de toute agitation et des variations de température. Les robinets ne furent ouverts qu'au bout d'un certain temps, après que les deux gaz se furent mis en équilibre de température avec le milieu ambiant. Après une communication de plusieurs heures, *les ballons furent séparés*, et l'on trouva : 1° *que chacun d'eux contenait des proportions égales d'hydrogène*

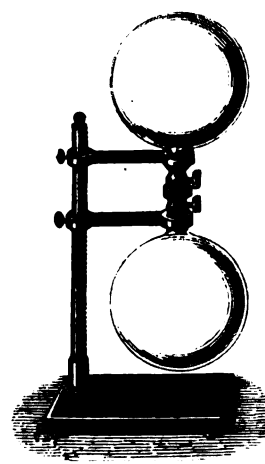


Fig. 194.

et d'acide carbonique; 2° que *la pression du mélange gazeux dans chaque ballon était égale à la pression initiale.*

En soumettant à la même épreuve tous les gaz qui n'ont pas entre eux d'action chimique, on obtient le même résultat. L'expérience fait voir, en outre, qu'*une fois mélangés, les gaz ne se séparent plus, quelle que soit la différence de leurs densités, et que plus celle-ci est grande, plus leur diffusion réciproque est prompte : c'est le gaz le plus pesant qui est le moins diffusible.* L'hydrogène, par exemple, se diffuse dans une direction descendante environ cinq fois plus vite que l'acide carbonique dans une direction ascendante.

189. **Lois du mélange des gaz.** — Tous ces faits généralisés sont renfermés dans les deux lois suivantes :

1° *Les gaz entre lesquels il n'y a pas d'action chimique se mélangent plus ou moins rapidement et d'une manière intime et permanente.*

2° La température restant constante, *la force élastique finale du mélange de plusieurs gaz est égale à la somme des forces élastiques qu'aurait chacun d'eux s'il occupait seul le volume total.*

Vérification. — Ces deux lois sont vérifiées par l'expérience même de Berthollet. Cela est évident pour la première loi. Quant à la deuxième, il suffit de remarquer que, la pression initiale de chaque gaz étant H sous le volume v d'un seul ballon, la pression finale qu'aurait chacun d'eux s'il occupait seul la capacité $2v$ des deux ballons, serait $\frac{H}{2}$: la somme de ces deux pressions est bien H, ainsi que Berthollet l'a constaté.

Formule générale. — La deuxième loi peut se formuler d'une façon générale. Soient v, v', v'' les volumes de trois masses de gaz sans action chimique les uns sur les autres, f, f', f'' leurs tensions respectives, et V le volume du vase dans lequel on les mélange. Le premier gaz, passant du volume v au volume V, acquiert une tension qui, d'après la loi de Mariotte, est égale à $\frac{fv}{V}$. De même la tension du second gaz devient $\frac{f'v'}{V}$, et celle du troisième $\frac{f''v''}{V}$. En représentant par F la somme de ces trois forces élastiques, on a

$$[1] \qquad F = \frac{fv + f'v' + f''v''}{V}.$$

En chassant le dénominateur dans l'équation [1], elle devient

$$[2] \qquad FV = fv + f'v' + f''v'' = \Sigma\,(fv).$$

Sous cette forme, qui est la plus commode pour les applications de calcul, cette loi rappelle la loi de Mariotte, dont elle est une conséquence. Elle ne s'applique

d'ailleurs au mélange de plusieurs gaz que *dans les limites de pression* où la loi de Mariotte s'appliquerait à chacun d'eux.

Cas particulier. — Dans le cas où $f = f' = f''$ et où $V = v + v' + v''$, on a

$$F = \frac{f(v + v' + v'')}{v + v' + v''} = f,$$

c'est-à-dire que la pression du mélange est la même que celle des gaz avant d'être mélangés; c'est ce qui avait lieu dans l'expérience de Berthollet.

190. **Dissolution** ou **Absorption des gaz par les liquides.** — L'eau et plusieurs liquides sont doués de la propriété de se laisser pénétrer par les gaz en proportions plus ou moins grandes : c'est en cela que consiste le phénomène de la *dissolution*[1].

Lois. — Les lois de la dissolution des gaz dans les liquides (sans action chimique sur eux) ont été découvertes et énoncées depuis longtemps par Henry (de Manchester) et par Dalton; elles ont été vérifiées ensuite et précisées par Bunsen[2].

1° Loi de Henry. — *Lorsqu'un gaz est en contact avec un liquide qui le dissout, il s'établit un rapport constant, pour une même température, entre le volume du gaz dissous, mesuré à la pression finale de l'atmosphère gazeuse, et le volume dissolvant.*

Coefficient de solubilité. — Ce rapport constant (c'est-à-dire indépendant de la pression finale), pour un même liquide et un même gaz, est appelé *coefficient d'absorption* ou *de solubilité*, quand il est mesuré à la température de 0°.

2° Loi de Dalton. — *Lorsqu'un mélange de plusieurs gaz est en contact avec un dissolvant, chacun des gaz s'y dissout comme s'il occupait seul le volume du mélange.*

Quant à la pression finale, relative à chacun des gaz, *c'est la pression que possède ce gaz dans le mélange gazeux non dissous.*

Considérons, par exemple, le cas de l'air atmosphérique. L'oxygène n'en formant sensiblement que $\frac{1}{5}$ en volume, l'eau, dans les conditions ordinaires, absorbe la même quantité d'oxygène que si l'atmosphère était tout entière formée de ce gaz, sous une pression égale à $\frac{1}{5}$ de la pression atmosphérique.

191. **Étude expérimentale de la solubilité.** — 1° *Méthode.* — Il y a deux cas à considérer dans le phénomène de la dissolution des gaz : celui où l'atmosphère gazeuse est illimitée, et alors la pression finale du gaz dissous est égale à la pression initiale; celui où l'atmosphère gazeuse est limitée, et alors la pression finale H est différente de la pression initiale H_0.

Le premier cas est celui de l'air atmosphérique, qui se dissout dans tous les

1. Le mercure paraît se refuser entièrement à la pénétration des gaz : on se rappelle que c'est *l'une des raisons qui l'ont fait choisir* pour liquide barométrique.

2. *Puis par Kanikoff et Louguinine.*

liquides qui sont à la surface de la terre et les sature de ses éléments gazeux, proportionnellement à leurs coefficients de solubilité et à la pression atmosphérique du moment. Le second cas est le seul que l'on puisse réaliser par l'expérience : c'est celui qui sert à étudier le phénomène de la dissolution.

Il y a une relation simple entre H_0, H, V et U, volume occupé par le gaz non dissous. Elle se déduit de la loi de Mariotte. En effet, avant la dissolution, la masse gazeuse occupait le volume U, à la pression initiale H_0 ; après la dissolution, elle occupe le volume U au-dessus du liquide, plus le volume cV à l'intérieur du liquide, ces volumes étant évalués à la pression finale H. On a donc

$$U H_0 = (U + cV) H.$$

Cette équation permet d'évaluer c dans des conditions déterminées de température et de pression. Tel est le principe de la méthode que Bunsen a employée à l'aide de l'*absorptiomètre* (fig. 195).

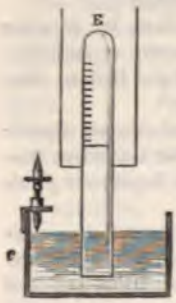


Fig. 195.

1° *Absorptiomètre de Bunsen.* — Cet appareil peut se réduire, schématiquement, à une éprouvette à gaz graduée, disposée sur une cuve à mercure, de manière qu'on puisse y introduire d'abord le gaz à dissoudre, puis le dissolvant, et qu'on puisse évaluer avec précision les volumes de l'un et de l'autre, ainsi que les pressions, au commencement et à la fin de l'expérience. La partie supérieure de l'éprouvette est entourée d'un manchon que l'on peut remplir d'eau à une température déterminée et constante. En appliquant l'équation ci-dessus, dont tous les coefficients peuvent être mesurés, on obtient la valeur de c dans les circonstances où l'on s'est placé.

2° *Résultats.* — *a.* L'expérience prouve que la première loi ne peut être considérée comme exacte que pour les gaz très peu solubles et jusqu'à une pression de 3 atmosphères. Même au-dessous de cette limite, la loi n'est pas applicable aux gaz notablement solubles, tels que l'acide sulfureux, l'acide chlorhydrique et le gaz ammoniac; elle n'est même pas rigoureuse pour l'acide carbonique.

b. La loi de Dalton peut être considérée comme exacte dans les mêmes limites que la première.

c. Le coefficient de solubilité diminue quand la température s'élève, suivant une loi qui n'est pas simple. D'après Bunsen, cette loi peut s'exprimer par une formule à trois termes,

$$c = A - Bt - Ct^2,$$

où A, B, C sont des constantes qui varient avec la nature du gaz. Il les a déterminées pour un grand nombre de gaz.

d. Le coefficient de l'hydrogène présente cette anomalie d'être sensiblement indépendant de la température entre 0° et 20°.

CHAPITRE V

APPLICATIONS DE L'EXPANSIBILITÉ DES GAZ

MACHINES PNEUMATIQUES.

192. **Machine pneumatique ordinaire.** — 1° *Définitions.* — On appelle *machines pneumatiques* des appareils qui permettent de *faire le vide* dans un espace clos, ou plutôt d'y *raréfier* l'air ou les gaz qui y sont contenus (car on ne peut réaliser le vide absolu). Le plus ancien de ces appareils est celui qu'on appelle *machine pneumatique ordinaire*, qui est restée la machine classique par excellence.

2° ***Historique.*** — La première idée de la machine ordinaire est due à Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg. Il en construisit (en 1650) un modèle rudimentaire, à un seul corps de pompe, qui lui suffit pourtant pour réaliser son expérience célèbre des ***hémisphères de Magdebourg***[1] (191).

3° ***Description.*** — a. ***Plate-forme, corps de pompe, platine, récipient.*** — La machine actuelle se compose d'une épaisse plate-forme de laiton VGL (fig. 196 et 197), fixée horizontalement sur une table. A l'une de ses extrémités sont solidement mastiqués deux cylindres de cristal, où se meuvent deux pistons de cuir P, P' : ces cylindres sont les *corps de pompe*. A l'autre extrémité, la plate-forme est munie d'un plateau ou *platine* V, sur laquelle est mastiquée une glace de verre dépolie et bien dressée. C'est là-dessus qu'on place le *récipient* R, dans lequel on doit faire le vide[2]. Au centre de la platine est une tubulure *n*, à pas de vis, sur laquelle on adapte à volonté des ballons de verre à robinet, ou tous autres vases dans lesquels on veut faire le vide. La communication entre le récipient et les corps de pompe est établie par un conduit *nc* pratiqué dans la plate-forme (fig. 197, coupe longitudinale de la

1. Les principaux perfectionnements apportés à la construction de cette machine furent imaginés par Boyle (en 1659), par Papin (en 1687), et les derniers sont dus à Senguerd (en 1685), *puis à Smeaton* (1751).

2. C'est *Papin qui substitua à l'ancien ballon d'Otto* de Guericke ce dispositif *commode d'une cloche placée sur une platine.*

machine). En arrivant aux corps de pompe, le conduit se bifurque pour atteindre leurs bases en *c* et en *d* (fig. 200).

b. *Tiges à crémaillères.* — Les tiges qui portent les pistons sont munies de crémaillères K et H, dans lesquelles engrène un pignon X (fig. 198). En faisant tourner ce pignon alternativement

Fig. 196.

en sens contraires, au moyen d'une manivelle MN, on fait monter l'une des crémaillères pendant que l'autre descend, et l'on imprime aux pistons[1] un mouvement alternatif.

c. *Pistons.* — Chaque piston se compose (fig. 199, coupe verticale) de deux disques de laiton A et B, entre lesquels sont des rondelles de cuir percées en leur centre et imbibées d'huile de

1. *C'est à Boyle qu'est* due l'adaptation, à la tige de chaque piston, d'une crémaillère engrenant avec une roue dentée.

pied de bœuf. Le disque B est surmonté d'une tubulure qui traverse toutes les rondelles, et sur cette tubulure est un pas de vis sur lequel se serre un écrou qui comprime fortement le disque A et les rondelles. Celles-ci, d'un diamètre un peu plus grand que les disques A et B, glissent à frottement doux contre les parois du corps de pompe, qu'elles ferment hermétiquement. Dans l'intérieur de la tubulure centrale est vissée une pièce D, sur laquelle se fixe

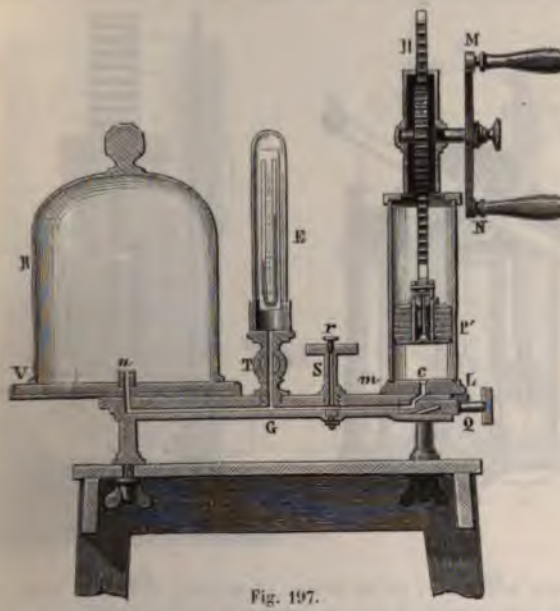


Fig. 197.

par un boulon la crémaillère qui fait mouvoir le piston. La pièce D est percée, dans toute sa hauteur, d'un conduit destiné à laisser passer l'air, de la partie inférieure du corps de pompe à la partie supérieure, et de là dans l'atmosphère (les corps de pompe n'étant pas hermétiquement clos dans le haut). Enfin, au centre du disque B est un trou *i*, fermé par une soupape métallique Z, qui s'ouvre de bas en haut. A cette soupape (représentée à gauche de la figure 199) est fixée une tige *e* qui s'engage librement dans le conduit de la *pièce D. Ce dispositif a pour* but d'empêcher la *soupape de chavirer lorsqu'elle est soulevée*. A la partie inférieure

de la soupape est un disque de liège x qui s'applique sur l'orifice i et le ferme.

Outre la soupape Z placée à l'intérieur du piston, une soupape conique s sert à fermer, à la base du corps de pompe, l'orifice c du conduit cn qui se rend au récipient (fig. 197). Cette soupape est fixée à l'extrémité inférieure d'une tige de fer a (fig. 199), qui traverse tout le piston, et se prolonge jusqu'au sommet du corps

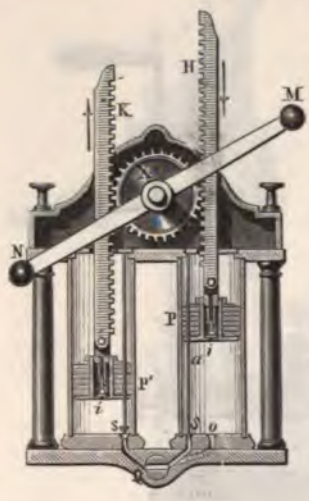


Fig. 198.

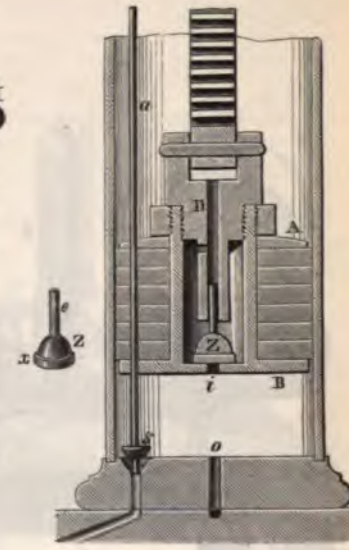


Fig. 199.

de pompe. La tige a pouvant glisser à frottement dur dans les rondelles de cuir du piston, il en résulte que, lorsque celui-ci descend, il entraîne avec lui la tige de fer et fait fermer la soupape s; s'il monte, la tige et la soupape sont soulevées, mais d'une très petite hauteur, parce que cette tige vient buter tout de suite contre la base supérieure du corps de pompe[1]. Alors elle ne fait plus que glisser dans le piston, qui s'élève seul.

d. *Robinets.* — Le robinet T sert à faire communiquer, par le

1. *Cette soupape à fonctionnement automatique est due à Papin. Elle remplaça un robinet, qu'il fallait manœuvrer à la main après chaque coup de piston, dans la machine primitive* d'Otto de Guericke.

conduit *cn*, le récipient R avec une éprouvette E, qui sera décrite ci-après (6°). Quant au robinet S, encore par le même conduit *cn*, il établit ou interrompt la communication entre le récipient et les corps de pompe. Lorsque ceux-ci fonctionnent, le robinet S doit être ouvert (fig. 197 et 200, I), et alors l'air est aspiré du récipient; mais une fois que le vide est fait dans ce dernier, comme l'air tend toujours à rentrer par les corps de pompe, on tourne le robinet S d'un quart de tour (fig. 200, II) et l'air ne

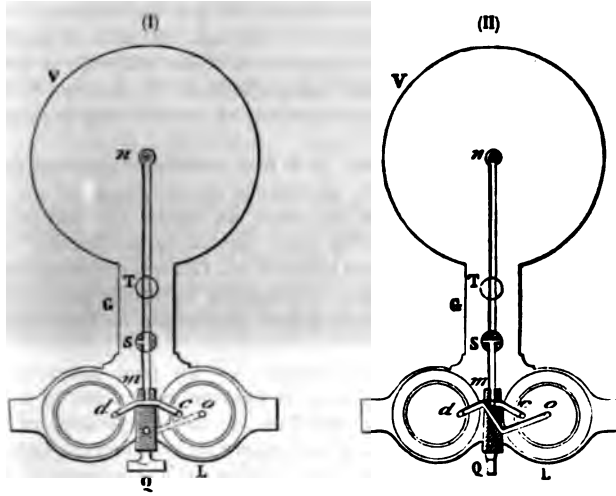


Fig. 200.

peut plus pénétrer dans le récipient qu'en s'infiltrant entre ses bords et la platine. C'est pourquoi ces bords doivent être dressés avec soin, de manière que le contact soit parfait; mais cela serait insuffisant : il faut encore, avant de les appliquer sur la platine, les enduire de suif. Le récipient, ainsi disposé, *tient le vide* des mois entiers.

Le robinet S est percé, suivant son axe, d'un conduit dont on ferme hermétiquement l'orifice à l'aide d'un bouchon métallique *r*. Le vide étant fait dans le récipient, lorsqu'on veut y faire rentrer l'air, il suffit d'enlever le bouchon *r*[1]. Le troisième robinet Q, placé entre les deux corps de pompe, est destiné à l'opération du

1. *L'adjonction de ce robinet pour la rentrée de l'air est due à Smeaton.*

double épuisement : c'est le robinet dit *de Babinet*, que nous décrirons ci-après.

4° *Fonctionnement.* — Supposons d'abord le piston P′ (fig. 198 et 199) au bas de sa course. A l'instant où l'on commence à faire marcher la manivelle, ce piston monte, entraînant avec lui la tige *a* et la soupape *s*, tandis que la soupape Z reste fermée par son propre poids et par celui de l'atmosphère. La communication entre le corps de pompe et le récipient est établie par le soulèvement de la soupape *s*, et une partie de l'air passe dans le corps de pompe. Lorsque ce piston s'abaisse, le jeu des soupapes est changé : la soupape *s* se ferme et l'air qui est sous le piston se trouvant de plus en plus comprimé finit par soulever la soupape Z et par s'échapper dans l'atmosphère par le conduit D. La même série de phénomènes se reproduit au second coup de piston et aux coups suivants.

5° *Limite du fonctionnement.* — Si bien construite que soit une machine, on ne peut éviter, au-dessous des soupapes et sur le contour du disque inférieur du piston, un *espace nuisible* où se loge un petit résidu d'air. Par suite, lorsque la raréfaction est poussée assez loin, il arrive un moment où, l'air qui est comprimé dans cet espace n'acquiert pas une tension suffisante pour soulever la soupape ; à partir de cet instant la machine ne fonctionne plus.

6° *Éprouvette* et *baromètre tronqué.* — On peut mesurer à chaque instant la force élastique de l'air qui reste dans le récipient à l'aide d'un petit manomètre de forme spéciale qu'on appelle *baromètre tronqué*. C'est une espèce de baromètre à siphon dont la grande branche a beaucoup moins de 76 centimètres de hauteur. Il est fixé sur une échelle divisée en millimètres, et placé sous une cloche de cristal ou *éprouvette* E (fig. 196), qui communique avec le récipient par le robinet T[1].

L'air du récipient a d'abord une force élastique qui fait équilibre, et au delà, au poids de la colonne de mercure qui est dans la branche fermée, et celle-ci reste pleine ; mais, à mesure que l'air se raréfie, le mercure finit par baisser dans la branche qu'il remplissait d'abord, et, à partir de cet instant, l'instrument fonctionne comme manomètre : la différence des niveaux du mercure dans les deux branches du siphon mesure évidemment la force élastique du gaz qui reste dans le récipient et dans les conduits de la machine.

Si l'on arrivait à faire le vide absolu, les niveaux s'établiraient

1. *Cet accessoire de la* machine fut imaginé par Smeaton (en 1751).

nécessairement sur un même plan horizontal; mais cela n'arrive jamais, même avec les meilleures machines.

7° *Calcul des épuisements successifs : loi du fonctionnement de la machine.* — Il y a deux cas à considérer : celui où l'on ne tient pas compte de l'espace nuisible, — cas purement théorique, — et celui où l'on tient compte de l'espace nuisible.

Cas théorique. — Soient R la capacité du récipient et du tube d'aspiration, C la capacité du corps de pompe, H_0 la pression initiale dans le récipient. Avant le premier coup de piston, le récipient contient une certaine masse d'air dont le volume est R et la force élastique H_0. On soulève le piston de l'un des corps de pompe, cette masse d'air se répand dans le cylindre : son volume devient R + C, et sa pression H_1. D'après la loi de Mariotte, on a

$$H_1(R + C) = H_0 R, \quad \text{d'où} \quad H_1 = H_0 \frac{R}{R + C}.$$

Si l'on abaisse maintenant le piston, la communication entre le cylindre et le récipient est immédiatement interrompue, et l'air du récipient conserve la pression H_1 : *donc H_1 représente la force élastique dans le récipient après le premier coup de piston.* On verra de la même manière que la pression dans le récipient, après deux coups de piston, est donnée par la formule

$$H_2 = H_1 \frac{R}{R + C} = H_0 \left(\frac{R}{R + C}\right)^2,$$

et, après *n* coups de piston, par la formule

$$H_n = H_0 \left(\frac{R}{R + C}\right)^n.$$

Cas d'un espace nuisible. — Soit *e* l'espace nuisible. Remarquons d'abord que, lorsqu'on abaisse le piston dans l'un des cylindres, l'air qui se trouve emprisonné entre la base du piston et le fond du cylindre s'échappe, en soulevant la soupape, *jusqu'au moment où sa force élastique est devenue égale à la pression extérieure.* Au début, lorsque le piston est au bas de sa course, nous avons deux masses d'air : l'une occupant le volume R du récipient, à la pression initiale H_0 ; l'autre occupant le volume de l'espace nuisible, à la pression atmosphérique extérieure H. Quand on soulève le piston, ces deux masses d'air se mélangent dans le volume total (R + C) et prennent une pression H_1, qui est donnée par l'équation du mélange des gaz,

$$H_1 (R + C) = H_0 R + He ;$$

d'où

$$H_1 = H_0 \frac{R}{R + C} + H \frac{e}{R + C}.$$

Quand on abaisse le piston, la communication est immédiatement interrompue entre le cylindre et le récipient, et celui-ci reste plein d'air à la pression H_1 : *donc* H_1 *représente la pression de l'air du récipient après un seul coup de piston.* On aura de même, après deux coups de piston,

$$[2] \qquad H_2 = H_1 \frac{R}{R+C} + H \frac{e}{R+C},$$

et ainsi de suite jusqu'au n^e coup de piston,

$$[n] \qquad H_n = H_{n-1} \frac{R}{R+C} + H \frac{e}{R+C}.$$

De cette série d'équations on déduit la valeur de H_n en fonction de H_0 : on multiplie les deux membres de l'équation $[n-1]$ par $\frac{R}{R+C}$, puis les deux membres de l'équation $[n-2]$ par $\left(\frac{R}{R+C}\right)^2$, et ainsi de suite jusqu'à l'équation $[2]$, dont on multiplie les deux membres par $\left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-2}$, et l'équation $[1]$, dont on multiplie les deux membres par $\left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-1}$.

En ajoutant, transformées membre à membre, toutes ces équations, on fait disparaître les termes intermédiaires dans la somme, et il reste

$$H_n = H_0 \left(\frac{R}{R+C}\right)^n + H \frac{e}{R+C} \left[\left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-1} + \left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-2} + \cdots + \frac{R}{R+C} + 1 \right].$$

En effectuant la somme de la progression géométrique croissante renfermée entre parenthèses, et en supprimant, au deuxième terme, le facteur commun (RH), on aura

$$[2] \qquad H_n = H_0 \left(\frac{R}{R+C}\right)^n + H \frac{e}{C} \left[1 - \left(\frac{R}{R+C}\right)^n \right].$$

193. **Limite du vide.** — Si l'on s'en tenait à la formule simplifiée

$$[1] \qquad H_n = H_0 \left(\frac{R}{R+C}\right)^n,$$

il n'y aurait pas de limite au vide, en ce sens qu'on pourrait se rapprocher du *vide absolu* autant qu'on voudrait, puisque H_n est d'autant plus petit que le nombre n des coups de piston est plus grand.

Mais la formule [2], qui tient compte de l'espace nuisible, est seule conforme à la réalité pratique, et par suite seule acceptable. Or, si l'on y fait $n = \infty$, elle donne

$$H_n = H \frac{e}{C} = \lambda.$$

λ représente donc la plus faible pression qu'on puisse atteindre, au bout d'un nombre *infini* de coups de piston : c'est proprement la *limite* du vide.

2° *Démonstration directe de la formule.* — On peut trouver cette formule sans passer par la loi générale des épuisements. Nous avons vu, en effet, que, lorsqu'on abaisse le piston, l'air confiné dans le corps de pompe soulève la soupape du piston et s'échappe tant qu'il a une pression supérieure ou égale à la pression extérieure. Si donc la limite est atteinte, c'est-à-dire si la soupape ne fonctionne plus, c'est que la masse d'air qui se répand dans le cylindre quand le piston est au haut de sa course, a une pression λ qui s'élevait *au plus* à la valeur H, lorsque la masse d'air était réduite au volume e de l'espace nuisible. En appliquant la loi de Mariotte, on a

$$He = C\lambda, \qquad \text{d'où} \qquad \lambda = H\frac{e}{C}.$$

Or, quand le piston est au haut de sa course, il y a communication entre le cylindre et le récipient : donc λ représente également la pression limite de l'air du récipient.

3° *Limite pratique.* — Dans la pratique, cette limite n'est même pas atteinte. Les meilleures machines pneumatiques de ce modèle ne peuvent pas diminuer la pression au delà de 1 ou 2 millimètres. Cela tient à ce que, outre l'espace nuisible, dont nous avons tenu compte, il existe des joints nombreux qui sont plus ou moins parfaits. La quantité de gaz expulsée est d'abord beaucoup plus grande que la quantité d'air qui rentre par tous ces joints; mais il arrive un moment où les deux actions se compensent; alors la limite pratique du vide est atteinte, et le jeu de la machine ne sert qu'à maintenir constante la pression finale.

194. **Robinet de Babinet** ou **Robinet à double épuisement.** — Babinet ajouta à la machine ordinaire un dispositif spécial qui permet de pousser la raréfaction de l'air beaucoup plus loin que la limite normale du vide.

1° *Description.* — C'est un robinet Q placé à la bifurcation du canal qui conduit l'air du récipient aux deux corps de pompe : il est percé, dans sa masse, de plusieurs conduits qu'on utilise successivement en le tournant dans deux positions rectangulaires. Les figures 201 (I et II) en représentent la coupe verticale dans ses deux positions. Les figures 200 (I et II) représentent, en coupe horizontale, les communications, entre le robinet et les corps de pompe, qui correspondent à ces deux positions.

Dans la position (I), le robinet établit, par un conduit central et par deux conduits latéraux, la communication entre le récipient et les corps de pompe, de n en c et en d, et la *machine fonctionne alors comme* il a été dit ci-dessus. Lorsqu'*elle ne fonctionne plus, c'est-à-dire lorsque* les soupapes Z ont cessé de *s'ouvrir, on tourne le robinet Q de 90 degrés* et *il* se trouve alors dans la

tion (II). A partir de ce moment, les autres conduits du robinet correspondent à ceux de la plate-forme, et le corps de pompe de droite communique seul avec le récipient par le conduit *nmc*, tandis que celui de gauche se trouve mis en communication, par un conduit qui traverse obliquement le robinet, avec une ouverture centrale *o*, pratiquée à la base du corps de pompe de droite, et toujours ouverte.

2° *Fonctionnement.* — Lorsqu'on soulève alors le piston de droite, on aspire l'air du récipient; mais lorsqu'on l'abaisse, l'air qui vient d'être aspiré est refoulé dans le corps de pompe de gauche par les orifices *o* et *d* (fig. 200); ce dernier est ouvert, puisque la surface conique qui lui correspond est soulevée. Lorsque ensuite le piston de droite remonte, celui de gauche s'abaisse; mais l'air qui est au-dessous ne retourne pas dans le corps de pompe de droite,

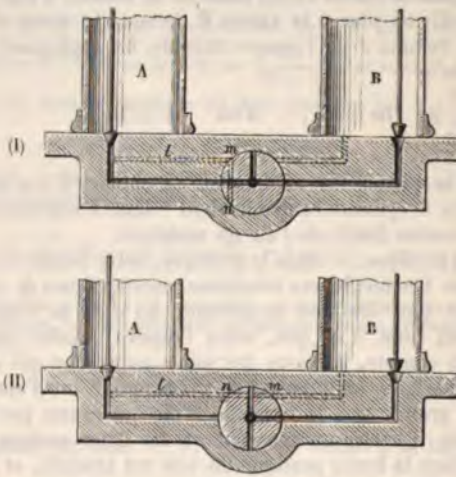


Fig. 201.

parce que l'orifice *d* est maintenant fermé par la soupape conique. Le piston de droite continuant ainsi à aspirer l'air du récipient et à le refouler dans le corps de pompe de gauche, l'air s'accumule dans celui-ci, et finit par y prendre une tension suffisante pour soulever la soupape Z du piston, ce qui était impossible avant que le robinet Q fût tourné. On voit, par suite, que la machine qui ne fonctionnait plus dans la position (I) du robinet, fonctionne de nouveau dans la position (II).

3° *Théorie.* — Dans la position (II) un seul des cylindres, le cylindre B par exemple, communique avec le récipient et y fait le vide, tandis que l'autre cylindre, A, communique avec le premier, et y puise l'air provenant du récipient (fig. 201). Une *nouvelle limite du vide* sera évidemment atteinte lorsque le piston cessera de nouveau de fonctionner dans le cylindre A. Supposons que *cette nouvelle limite soit* atteinte : à partir de ce moment, l'air refoulé dans *l'espace nuisible e, y prend* une pression au plus égale à la pression extérieure *H. C'est pourquoi* la soupape du piston ne se soulève plus. Soit x la

pression qu'avait cette même masse d'air lorsque ce même piston était au haut de sa course ; λ est lié à la pression H par la loi de Mariotte. On a, en effet, en appelant C_1 la capacité du cylindre A,

$$\lambda C_1 = e_1 H, \qquad \text{d'où} \qquad \lambda = H \times \frac{e_1}{C_1}.$$

Or, quand le piston du cylindre A est au haut de sa course, l'autre piston est au bas de sa course dans le cylindre B, et l'espace nuisible de celui-ci communique librement, par l'intermédiaire du robinet de Babinet, avec le cylindre A ; donc la pression est également λ pour la masse d'air qui est confinée dans l'espace nuisible de B. Soit λ_1 la pression qu'avait cette même masse d'air quand le piston était au haut de sa course. On a de même, en appelant C la capacité du cylindre B,

$$\lambda e = \lambda_1 C, \qquad \text{d'où} \qquad \lambda_1 = \lambda \frac{e}{C} = H \times \frac{e}{C} \times \frac{e_1}{C_1}. \qquad [1]$$

Enfin, quand le corps de pompe B communiquait librement avec le récipient, l'air resté dans celui-ci avait la même pression que dans B ; donc λ_1 représente la pression limite finale dans le récipient, c'est-à-dire la *nouvelle limite du vide*.

4° *Nouvelle formule du vide.* — Si l'on suppose $e_1 = e$ et $C_1 = C$, ce qui revient à considérer la machine comme parfaitement symétrique, et les capacités des conduites de la masse métallique comme négligeables, la formule devient

$$[2] \qquad \lambda_1 = H \left(\frac{e}{C}\right)^2.$$

La fraction qui représente la nouvelle limite du vide est donc le carré de celle qui représentait la première limite. C'est pourquoi l'on exprime quelquefois l'effet du robinet de Babinet en disant qu'il sert à faire *le vide du vide*.

Remarque. — Dans le calcul précédent, nous avons négligé l'effort nécessaire pour soulever le poids du piston et annuler la résistance de la soupape. Si l'on en tenait compte, il faudrait l'ajouter à la pression extérieure H. On aurait alors, en appelant ε la somme de ces deux pressions additionnelles,

$$[1] \qquad \lambda = (H + \varepsilon) \times \frac{e}{C} \times \frac{e_1}{C_1} \qquad \text{et} \qquad \lambda_1 = (H + \varepsilon) \left(\frac{e}{C}\right)^2. \qquad [2]$$

195. Usages de la machine pneumatique. Expériences classiques. — On a déjà décrit un grand nombre d'expériences qu'on fait à l'aide de la machine pneumatique. Telles sont les expériences du *tube de Newton* (44), du *marteau d'eau* (44), de la *vessie dans le vide* (140), du *crève-vessie* (142), des *hémisphères de Magdebourg* (142) et du *baroscope* (160). On peut en citer quelques autres qui sont également classiques, par exemple celles de la *fontaine dans le vide* et de la *pluie de mercure*.

Fontaine dans le vide. — On prend un globe de verre A (fig. 202), très allongé et muni à sa base d'une garniture à robinet, avec une tubulure qui s'élève à l'intérieur. Ayant vissé ce globe sur platine, on y fait le vide, on ferme le robinet, puis on porte

pareil dans un vase R contenant de l'eau. Si l'on ouvre alors le robinet, la pression atmosphérique qui s'exerce sur l'eau la fait jaillir par la tubulure, comme l'eau d'une fontaine.

Fig. 202.

Pluie de mercure. — Cette expérience démontre la perméabilité de certaines substances peu poreuses en apparence, telles que la peau de chamois, le cuir épais, le bois coupé perpendiculairement aux fibres : un disque ou une rondelle de l'une de ces substances forme le fond d'un godet en cuivre, que termine à la partie supérieure un long tube à vide, analogue au tube de Newton. Le godet étant rempli de mercure, si l'on fait le vide au-dessous, dans le tube, le liquide traverse le fond poreux du godet, sous l'influence de la pression atmosphérique et tombe en pluie fine dans le tube.

196. **Machine pneumatique de Bianchi.** — M. Bianchi a inventé une machine pneumatique qui présente plusieurs avantages sur la machine ordinaire. Elle est d'abord d'un maniement beaucoup plus commode, parce que le mouvement de va-et-vient du piston est produit par l'intermédiaire du mouvement rotatif d'un volant à manivelle. Le fonctionnement du piston est rendu ainsi à la fois plus facile et plus rapide. Et comme on peut donner au cylindre de grandes dimensions, il en résulte que cette machine permet de faire un vide aussi complet que la machine ordinaire dans des récipients plus grands et en un temps plus court.

Description. — La machine est entièrement construite en fonte ; elle n'a qu'un seul cylindre, qui peut osciller sur un axe horizontal fixé à sa base (fig. 203). Sur un bâti de fonte est monté un arbre horizontal, avec un volant très lourd V, qu'on fait tourner à l'aide d'une manivelle M. A ce même arbre est fixée une bielle *m* qui s'articule à la tête de la tige du piston. Par suite, *à chaque révolution* complète du volant, le cylindre fait deux oscillations sur *son axe.*

D'ailleurs, bien que la machine ne possède qu'un seul corps de pompe, elle

est *à double effet*, c'est-à-dire que le piston fait le vide en montant et en descendant. Cela tient à la construction spéciale du piston. Celui-ci porte d'abord une soupape *b* (fig. 204) pouvant s'ouvrir de bas en haut, comme dans la ma-

Fig. 205.

chine ordinaire; mais, en outre, sa tige AA est creuse, et donne passage à un tube de cuivre rouge V, par où s'échappe l'air qui sort par l'orifice *b*. Dans la base supérieure du cylindre même est logée une seconde soupape *a*, qui s'ouvre aussi de bas en haut. Enfin, *une tige de fer* D traverse à frottement dur le piston, *et se termine à ses deux extrémités* par deux bouchons coni-

ques *s* et *s'*, pouvant fermer tour à tour les deux orifices parallèles d'un tube d'aspiration BC à deux branches.

Fonctionnement. — Supposons que le piston descende. La soupape *s'* est alors fermée, et, la soupape *s* étant ouverte, l'air du récipient se rend au-dessus du piston, tandis qu'en dessous l'air comprimé par celui-ci soulève la soupape *b* et se dégage par le tube X. Quand le piston remonte, l'aspiration se fait par *s'*, et, la soupape *b* étant fermée, l'air comprimé se dégage par la soupape *a*. On comprend donc bien pourquoi la machine est à double effet bien qu'ayant un seul cylindre : c'est que les deux régions inférieure et supérieure, séparées par le piston, fonctionnent tour à tour comme les deux cylindres d'une machine ordinaire.

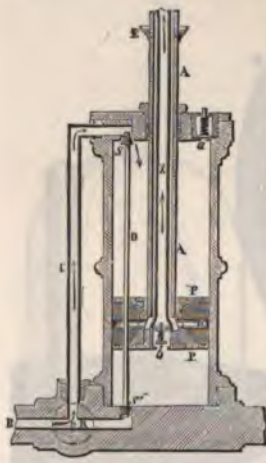


Fig. 204.

Robinet à double épuisement. — On comprend de même qu'on puisse adapter à la machine un robinet à double épuisement R, semblable au robinet de Babinet. Ce robinet est disposé en R (fig. 204) au point de jonction des deux branches du tube d'aspiration. En le tournant convenablement, on peut établir, à un moment donné, la même relation entre les deux portions du cylindre unique qu'entre les deux cylindres de la machine ordinaire.

Mode de graissage particulier. — Une des principales raisons du bon fonctionnement de cette machine, c'est qu'elle est, en outre, munie d'un système de graissage particulier : un godet E (fig. 204), fixé à la tige, est rempli d'huile qui tombe dans l'espace annulaire compris entre la tige AA et le tube X ; de là elle se rend dans un conduit *oo* pratiqué dans la masse du piston, et, refoulée par la pression atmosphérique, elle se distribue d'une manière permanente sur le pourtour du piston.

197. **Machine pneumatique de Deleuil.** — *Principe.* — C'est aussi une machine rotative, à un seul corps de pompe et à double effet, comme la précédente ; mais elle présente ce caractère particulier, que son piston glisse sans frottement, et sans addition d'huile, dans le cylindre, dont il ne touche pas les parois. La construction de cette curieuse machine est fondée sur ce fait que *les gaz circulent très difficilement à travers les conduits capillaires, surtout si ceux-ci sont munis de dilatations et d'étranglements alternatifs.* Avec cette machine on peut obtenir assez vite un vide de 2 à 3 millimètres dans un récipient de 13 à 14 litres.

Description. — Le piston est un long cylindre métallique plein P (fig. 205), dont la surface est sillonnée de rainures horizontales. Son diamètre étant plus petit que celui du cylindre (d'environ $\frac{1}{50}$ de millim.), il peut y glisser sans le *boucher complètement* ; mais le bourrelet d'air qui se loge dans les rainures

forme une sorte de cloison compressible qui suffit pour séparer les gaz dans les deux compartiments du cylindre.

Le mouvement est transmis au piston par une tige métallique qui traverse les deux fonds du cylindre. Le récipient communique alternativement avec chaque compartiment du cylindre par l'intermédiaire d'un double tube recourbé, dont les extrémités débouchent en S et S'. Les orifices sont successivement fermés par deux bouchons coniques que porte la tige TT, laquelle traverse à frottement le piston et est entraînée dans son mouvement. Enfin deux ouvertures à soupape A, A' mettent chaque compartiment en communication avec l'atmosphère, par l'intermédiaire d'un double tube abducteur dont les extrémités se réunissent en R.

Le cylindre n'est pas *oscillant*, comme celui de Bianchi, il est *fixe* : il a donc fallu employer un dispositif spécial pour communiquer au piston, par le mouvement rotatif du volant, un mouvement rectiligne alternatif. M. Deleuil a réalisé cette transformation de mouvements à l'aide d'un *engrenage de la Hire*.

Fig. 205.

198. **Pompe pneumatique de E. Carré.** — C'est une machine pneumatique à un seul corps de pompe et à simple effet. Elle présente ce triple caractère spécial : 1° de réaliser d'emblée le vide qu'on obtient d'ordinaire à l'aide du robinet de Babinet ; 2° d'être dépourvue d'espace nuisible ; 3° de fournir *un vide sec*.

Description. — Le cylindre est séparé, par le piston, en deux compartiments de grandeur variable. L'air du récipient arrive dans le compartiment inférieur quand le piston est au haut de sa course. Dès que celui-ci s'abaisse, l'air est comprimé et soulève une première soupape, qui est à la base du piston, et passe, à travers celui-ci, dans le compartiment supérieur. Quand le piston se relève, sa soupape se referme, l'air qui est au-dessus de lui est comprimé, soulève une seconde soupape et s'échappe dans l'atmosphère. On voit donc que c'est le compartiment supérieur qui fait le vide dans le compartiment inférieur, tandis que *celui-ci communique seul* avec le récipient.

De plus, *il n'y a pas d'espace nuisible, parce que* les deux soupapes dé*passent légèrement leurs orifices respectifs, et qu'elles* sont nécessaireme

soulevées par la pression du piston entre les bases du cylindre (fig. 206).

Le piston est fixé à l'extrémité d'une tige rigide, qu'on fait mouvoir à l'aide d'un balancier à manette. L'air du récipient est aspiré par l'intermédiaire d'un tube *hr*. Il passe dans un vase R, au-dessus d'un bain d'acide sulfurique, dont on renouvelle constamment la surface à l'aide d'un agitateur *eA*, qui est également mis en mouvement par le balancier. On parvient ainsi à absorber

Fig. 206.

toute la vapeur d'eau du gaz raréfié, et à obtenir rapidement un vide sec à 1 demi-millimètre.

Remarque. — Cette machine est souvent appelée *congélateur*, à cause de son usage spécial, qui consiste à produire en grand la congélation de l'eau par ébullition dans le vide sec; mais elle peut être substituée dans tous les cas, avec beaucoup d'avantages, à la machine pneumatique ordinaire à double effet. Il suffit de remplacer la carafe d'eau, ordinairement adaptée à l'orifice du tuyau d'aspiration, par une platine ordinaire de machine pneumatique.

MACHINES PNEUMATIQUES A MERCURE.

199. **Principe et généralités.** — Le principe des machines à mercure consiste à répéter commodément et indéfiniment l'expérience de Torricelli sur un récipient à gaz, de manière à transformer celui-ci en une espèce de chambre barométrique : on réalise ainsi dans le récipient une sorte de vide barométrique

qui est beaucoup plus parfait que celui des machines à piston les plus perfectionnées. De plus, grâce à l'emploi d'une colonne de mercure en guise de piston, l'espace nuisible y est totalement supprimé. On arrive sûrement, en prenant certaines précautions (que nous indiquerons plus loin), à amener les deux niveaux du mercure, dans le manomètre de la machine, à n'avoir plus de différence appréciable.

La première idée de cette machine est due à Regnault; le premier modèle pratique qui ait été réalisé est dû au constructeur Geissler de Berlin (en 1857). Ce sont les frères Alvergniat, constructeurs de Paris, qui amenèrent la machine à son degré de perfection actuel. Il existe une autre machine à mercure due à M. Jamin, et construite sur un tout autre type que celle de Geissler.

200. **Machine d'Alvergniat** (modèle primitif). — 1° *Description.* — Cet appareil, à peu près tout construit en verre, ce compose de deux réservoirs A et B (fig. 207, I et II) reliés entre eux par un tube barométrique T et par un tube de caoutchouc C. Le réservoir B et le tube T sont fixés à une planchette verticale; le réservoir A, qui est libre et ouvert, s'élève et s'abaisse alternativement sur une course de 1,12 m. Ce déplacement se produit au moyen d'un long ruban de fil qui, attaché par un bout au réservoir A, passe sur une poulie *a* et de là vient s'enrouler sur une seconde poulie *b*, qu'on fait tourner à l'aide d'une manivelle. Au-dessus du réservoir B est un robinet à trois voies *n*, d'où part un tube *d* qui sert à l'aspiration, et sur la gauche est un robinet simple *m*, qui établit la communication avec un réservoir à mercure *v* et avec l'atmosphère. Le tube d'aspiration *d* n'est pas directement en communication avec le récipient dans lequel on veut faire le vide; il se rend d'abord à un réservoir *o*, en partie rempli d'acide sulfurique destiné à dessécher les gaz qui arrivent dans l'appareil. C'est enfin un tube de caoutchouc *e* qui établit la communication avec le récipient. Le réservoir *o* est muni d'un petit manomètre à mercure *p*.

2° *Fonctionnement.* — Le réservoir A étant au haut de sa course (fig. 207, I), le robinet *m* ouvert et le robinet *n* tourné comme on le voit en Z, le tuyau de caoutchouc C, le tube T, le réservoir B et le tube qui est au-dessus sont remplis de mercure jusqu'en *v* (fig. 207, I). Si l'on ferme alors le robinet *m* (fig. 207, Y), et qu'on abaisse le réservoir A (fig. 207, II), le mercure descend dans le réservoir B et dans le tube T jusqu'à ce que la différence de niveau dans les deux branches soit égale à la hauteur barométrique, et le vide se fait dans le réservoir B. On tourne alors le robinet *n* (fig. 207, X), le gaz du récipient dans lequel on fait le vide arrive par les tubes *c* et *d* dans la chambre barométrique B, et le niveau s'abaisse de nouveau dans le tube T. On remet alors les robinets dans la position initiale (fig. 207, Z) et l'on remonte le réservoir A; l'excès de pression du mercure qui est dans le tube de caoutchouc chasse par les robinets *n* et *m* le gaz qui avait pénétré dans la chambre B, et si quelques gouttelettes de mercure sont entraînées, elles sont recueillies dans le vase *v*. On répète cette opération jusqu'à ce que le mercure du manomètre *p* soit sensiblement au même niveau dans les deux branches.

Précautions à prendre dans la manœuvre. — Cette machine permet de pousser le vide jusqu'à $\frac{1}{10}$ de millimètre, pourvu que le mercure soit bien sec. Mais, son action étant très lente, la manœuvre serait longue et fastidieuse dans le cas de récipients un peu vastes. Aussi ne les emploie-t-on directement que pour faire le vide dans de petites capacités. Quant il s'agit de grands vases, on commence par y faire le vide à 1 centimètre environ avec une machine ordinaire, puis on achève avec la machine à mercure. Pour faire ainsi le vide dans de grands tubes, qui ont jusqu'à 10 litres de capacité, il faut plusieurs heures; on fait marcher la machine par intermittences de 15 à 20 minutes, surtout à la fin de l'opération.

201. **Machine d'Alvergniat** *(nouveaux modèles).* — Dans les machines que construit aujourd'hui M. Alvergniat, le mouvement d'ascension et de descente

du réservoir A ne s'obtient plus à l'aide du système de rubans et de poulies précédemment décrit. Une *chaine de Galle* s'attache d'une part au réservoir et, d'autre part (fig. 215), va s'enrouler sur une petite roue dentée qui est le der-

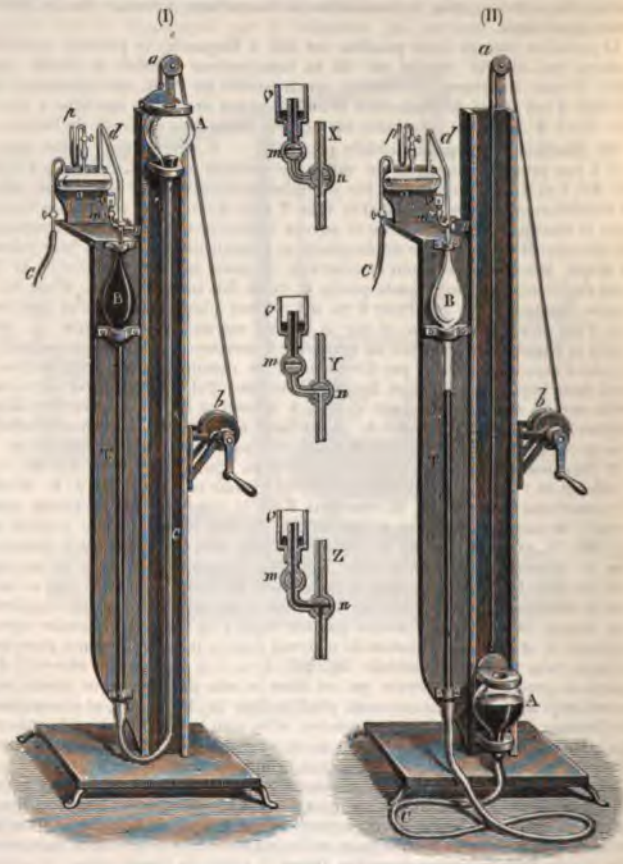


Fig. 207.

nier terme d'une série d'engrenages. On met le système en mouvement en agissant sur la manivelle d'un volant, de manière à faire monter ou descendre à *volonté le réservoir :* il faut avoir la précaution de soulever préalablement un *cliquet servant d'arrêt* à tout le système. Quant aux autres pièces, elles restent à *peu de chose près* les mêmes.

Machine sans robinets. — Depuis peu de temps M. Alvergniat construit des machines complètement dépourvues de robinets, et qui fonctionnent automatiquement à l'aide du simple balancement vertical du réservoir.

CHAPITRE VI

APPLICATIONS DE L'ÉLASTICITÉ DES GAZ

—

POMPES DE COMPRESSION. — TROMPES SOUFFLANTES ET ASPIRANTES. APPLICATIONS DE L'AIR COMPRIMÉ.

202. **Machines de compression.** — De même qu'on peut raréfier l'air et tous les gaz dans un récipient grâce à leur expansibilité, de même on peut les y comprimer grâce à leur compressibilité. On pourra ensuite utiliser, comme un ressort métallique, cette masse gazeuse comprimée, qui se détendra, grâce à son élasticité, dès qu'on lui ouvrira une issue.

La compression de l'air et des gaz s'effectue à l'aide d'instruments spéciaux, appelés *machines* ou *pompes de compression*.

Fig. 208.

Machines à deux corps de pompe. — Une machine pneumatique ordinaire, où le jeu des soupapes serait renversé, pourrait servir de machine de compression. Tandis que dans la machine pneumatique les soupapes s'ouvrent de bas en haut, ici elles s'ouvriraient de haut en bas (fig. 208). Cette forme de machine à deux corps de pompe a été construite, et se rencontre encore dans les vieilles collections. Mais l'appareil ainsi construit est à la fois incommode, volumineux et peu solide. Il a été complètement abandonné et remplacé par des machines à un seul cylindre et à simple effet, dites *pompes de compression*.

203. **Pompe à main.** — C'est la plus simple et la plus commode des pompes *de compression. Elle peut avoir l'une des deux formes indiquées aux figures 209 et 210.*

Description. — La *pompe à main* se compose d'un corps de pompe A de petit diamètre (fig. 209), dans lequel on fait mouvoir à la main, au moyen d'une poignée, un piston *plein* (c'est-à-dire sans soupape). Le corps de pompe est muni, à sa base, de deux tubulures horizontales à robinet; dans ces tubulures sont deux soupapes *o* et *s*, agissant en sens contraires, pour servir, la

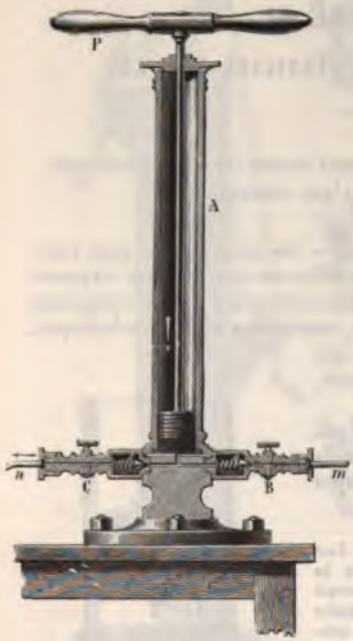


Fig. 209.

Fig. 210.

première à l'aspiration, la seconde au refoulement. De petits ressorts à boudin appuient sur les soupapes pour les maintenir fermées.

On place maintenant des robinets à trois voies, en B et C, sur les tubulures latérales du cylindre; cela permet de rétablir à volonté la pression atmosphérique soit dans la pompe seule, soit dans le récipient seul, soit des deux côtés à la fois.

Utilisation des pompes de compression comme machines pneumatiques. — Ces pompes peuvent aussi servir à faire le vide. Pour

cela, on fait communiquer la tubulure *m* avec le récipient d'où l'on veut aspirer l'air et la tubulure *n* avec l'atmosphère.

204. **Machine de compression de Regnault.** — Regnault s'est

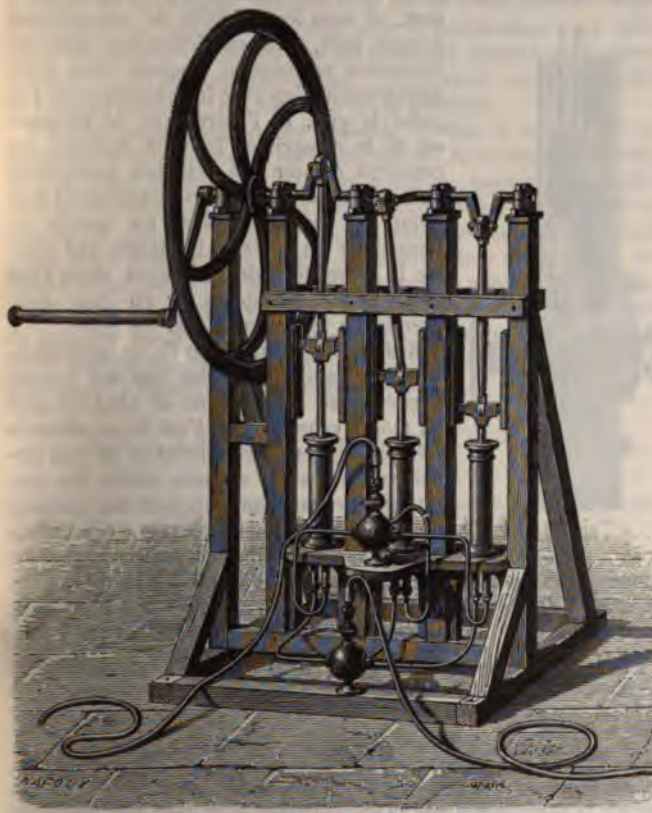


Fig. 211.

servi, dans ses expériences sur la loi de Mariotte, d'une machine de compression assez puissante pour donner au gaz du réservoir une pression de 30 atmosphères.

Description. — Cette machine est constituée par la réunion de *trois pompes à main perfectionnées, dites* pompes Silbermann

(fig. 211). Les tiges des trois pistons sont articulées, par l'intermédiaire de trois *bielles*, à trois portions coudées d'un même axe. Cet axe, muni d'un volant, est mis en mouvement à l'aide d'une ou deux manivelles. Tous les conduits d'aspiration d'une part, et tous les conduits de compression d'autre part, viennent déboucher dans des réservoirs sphériques, lesquels sont reliés directement, l'un avec le gazomètre où l'on puise le gaz, et l'autre avec le récipient où on le comprime. Tout cet appareil est construit comme une machine industrielle et établi sur le sol, où il est solidement boulonné, de manière à être au besoin actionné par un moteur. La figure 212 montre la disposition des soupapes dans l'une des pompes accouplées et en fait comprendre le fonctionnement.

Fig. 212.

Remarque. — Comme on l'a vu précédemment, la compression des gaz est accompagnée d'un dégagement de chaleur plus ou moins considérable. C'est là un obstacle très sérieux au fonctionnement de ces machines. La chaleur dégagée altère les garnitures et peut faire gripper les pistons. On atténue ces inconvénients, dans quelques machines industrielles, en noyant les soupapes inférieures dans un réservoir d'eau à une température constante. On arrive ainsi à comprimer l'air, sans inconvénients, au delà de 50 atmosphères.

205. **Pompe Cailletet.** — M. Cailletet a supprimé à la fois l'inconvénient de l'échauffement et celui de l'*espace nuisible* dans une pompe de compression *à piston mercuriel*, qu'il a spécialement construite pour ses expériences de liquéfaction des gaz.

L'originalité de cet appareil réside dans la disposition du piston. Le corps de pompe et le piston sont renversés; au-dessus de ce dernier se trouve une couche de mercure, de sorte que, à chaque coup de piston, le mercure vient remplir complètement le fond du corps de pompe (supprimant ainsi tout espace nuisible) et soulever la soupape qui établit la communication avec le récipient (cette soupape, qui est en ébonite, ne peut être altérée par l'action du mercure). Quant à la soupape d'aspiration, elle est supprimée. M. Cailletet l'a remplacée par un robinet, qui s'ouvre et se ferme en temps voulu au moyen d'un système de cames. Enfin le mouvement du piston est produit mécaniquement, à l'aide du mouvement rotatif d'un volant.

Cette pompe permet de comprimer des masses de gaz considérables sous des *pressions de plusieurs* centaines d'atmosphères. Elle a servi à M. Cailletet pour *liquéfier d'abord l'acide* carbonique, le protoxyde d'azote et l'éthylène, puis à

comprimer les gaz permanents, qu'il a pu aussi liquéfier en joignant à la compression l'action réfrigérante des liquides précédemment obtenus.

206. Théorie des machines de compression. — Quelle que soit la forme de la machine employée, la loi de condensation du gaz est toujours la même. Ici, comme pour la raréfaction, il y a deux cas à considérer : celui où l'on ne tient pas compte de l'espace nuisible — cas purement théorique — et le cas où l'on tient compte de l'espace nuisible, qui est celui de la pratique.

1° *Condensation sans espace nuisible.* — Soit R la capacité du récipient, C la capacité du corps de pompe, H_0 la pression initiale du gaz dans le récipient, et H la pression, *supposée constante*, dans le réservoir. Au début, le piston étant soulevé, le cylindre se remplit de gaz à la pression H, et la soupape est baissée : nous avons donc deux masses de gaz distinctes, l'une occupant le volume C à la pression H et l'autre occupant le volume R à la pression H_0. Quand on abaisse le piston, la soupape cède et tout le gaz du cylindre passe dans le récipient. A ce moment, on a un mélange gazeux occupant le volume R à la pression finale H_1. En appliquant l'équation du mélange des gaz, on a

$$H_1 R = H_0 R + HC, \qquad \text{d'où} \qquad H_1 = H_0 + H\frac{C}{R};$$

H_1 est la pression dans le récipient après le premier coup de piston. Après le deuxième coup, on aura de même

$$H_2 = H_1 + H\frac{C}{R}, \quad \text{ou bien} \quad H_2 = H_0 + 2H\frac{C}{R}.$$

Après 3, 4, ... n coups, on aura

$$[1] \qquad H_n = H_0 + nH\frac{C}{R}.$$

2° *Condensation avec l'espace nuisible.* — Soit e l'espace nuisible. On a de même au début, quand le piston est au haut de sa course, deux masses de gaz distinctes, l'une occupant le volume R à la pression H_0 et l'autre le volume C à la pression H. Mais lorsque le piston est au bas de sa course, le gaz est réduit au volume R, augmenté du volume e de l'espace nuisible; on a donc un mélange gazeux occupant le volume total $R + e$ à la pression totale H_1. L'équation du mélange des gaz donne

$$(R + e)H_1 = RH_0 + CH, \qquad \text{d'où} \qquad H_1 = H_0\frac{R}{R+e} + H\frac{C}{R+e}.$$

On peut *ainsi calculer les pressions successives* H_1, H_2,... H_n. On aura une *suite d'équations analogues, d'où l'on pourra déduire* une relation finale entre

H_n, H_0 et les données de l'appareil (*même procédé d'élimination de* H_1, H_2, H_{n-1} *que pour la loi de raréfaction*). On arrivera ainsi à la formule

$$[2] \qquad H_n = H_0 \left(\frac{R}{R+e}\right)^n + H\frac{C}{e}\left[1 - \left(\frac{R}{R+e}\right)^n\right].$$

207. Limite de la condensation. — 1° *Formule.* — D'après la formule [1] il n'y aurait pas de limite à la condensation du gaz dans le récipient. En effet, la pression H_n au bout de n coups de piston est la somme de n termes d'une progression *arithmétique* dont la raison est $\frac{C}{R}H$. Cette somme peut devenir plus grande que toute quantité donnée; pour $n = \infty$, on aurait $H_n = \infty$.

Mais ce n'est là qu'un cas purement théorique, puisqu'il existe toujours un espace nuisible plus ou moins grand dans les machines les mieux construites. Il faut donc appliquer la formule [2]. Si l'on y fait $n = \infty$, il vient

$$H_n = \frac{C}{e}H = \lambda,$$

c'est-à-dire que la pression ne croît pas indéfiniment dans le récipient; elle tend vers la valeur limite λ, qu'elle n'atteint d'ailleurs jamais, puisqu'il faudrait pour cela donner un nombre infini de coups de piston.

2° *Démonstration directe de la formule.* — On peut trouver λ directement, comme dans le cas du vide. En effet, la machine cessera de fonctionner, par le fait de l'espace nuisible, lorsque la pression dans le récipient finira par atteindre celle que le gaz atteint dans l'espace nuisible, chaque fois que le piston est au bas de sa course. Or, H étant la pression initiale du gaz qui remplit le cylindre quand le piston est au haut de sa course, la pression finale, lorsque cette masse est réduite au volume e, est donnée par la loi de Mariotte. On a

$$\lambda e = HC, \qquad \text{d'où} \qquad \lambda = H\frac{C}{e}.$$

Lorsque la pression sera devenue λ dans le récipient, la soupape, étant également pressée de part et d'autre, ne s'ouvrira plus, et la machine cessera de fonctionner.

3° *Limite pratique de la condensation.* — Les imperfections de construction empêchent généralement d'atteindre cette limite théorique. Il y a des fuites, qui sont de plus en plus abondantes, et qui finissent par égaler les introductions; à ce moment, la *limite pratique* est atteinte : on ne gagne plus rien à pomper, on ne fait qu'entretenir la pression maximum.

4° *Remarque générale.* — L'existence de l'espace nuisible dans les machines de compression n'a pas le même inconvénient que *dans les machines* pneumatiques. Dans celles-ci, en effet, qui ont *pour fonction de raréfier l'air autant que possible*, l'espace nuisible

oppose à la raréfaction une limite qu'on peut reculer, mais qu'on ne peut supprimer. Les machines de compression sont destinées au contraire à obtenir une pression plus ou moins grande, mais déterminée. Le constructeur peut donc toujours régler d'avance le rapport de $\frac{C}{e}$ de manière que la limite théorique λ soit plus élevée que la pression qu'on veut atteindre : dans ce cas, l'*espace nuisible* ne *nuit* pas en ré[illegible] l'effet définitif.

TROMPES A[illegible]T [illegible]LANTES.

208. Définitions. — Principe. — [illegible] *rompes aspirantes et soufflantes* des appareils qui *aspirent* l'air [illegible]nt pour le *souffler* ou le comprimer da[illegible]ls fonctionnent en quelque sorte autor[illegible] par l'intermédiaire d'un courant d'eau [illegible] liquide.

Considérons un courant liqu[illegible] écoule dans un canal de direction quelcon[illegible] de forme particulière, qui constitue esse[illegible] la *trompe*. Il est formé par deux cylindre[illegible]me rayon qui sont réunis soit par un ajutage cylindrique plus étroit et continu (fig. 213), soit par un ajutage discontinu composé de deux troncs de cône opposés par leurs petites bases (fig. 214). Supposons que le régime permanent du courant soit établi, c'est-à-dire que la vitesse de l'écoulement, en chaque point du canal, ne dépende que de la position de ce point et soit indépendante du temps. Si le liquide va dans le sens de la flèche, c'est-à-dire de *mn* vers H (fig. 213), de la partie étroite vers la partie renflée, la vitesse du courant est nécessairement moins grande ici que là et subit, par suite, une diminution plus ou moins brusque dans cet intervalle ; or on constate que, en même temps que la vitesse diminue, la pression exercée sur chaque tranche de liquide augmente, de sorte que si le gros bout du canal débouche dans l'atmosphère, où la pression

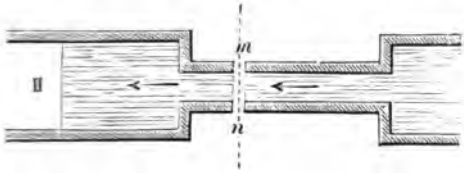


Fig. 213.

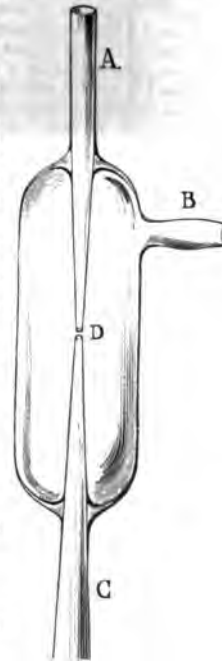


Fig. 214.

est H, la pression sur une tranche *mn* de la portion étroite est inférieure à H'. Si donc on a pratiqué dans l'épaisseur de la paroi des ouvertures *m* et *n*, l'air extérieur sera poussé dans le canal, *à cause de la différence* des pressions, et entraîné avec *le courant liquide*.

Par conséquent, *le vide se fera en m*, et si le canal est mis en communication, par cet orifice, avec un récipient à gaz, l'appareil pourra *y faire le vide*. Si le courant d'eau se rend en H dans un récipient fermé, le gaz se dégagera du liquide qui l'entraîne, et pourra s'accumuler et se comprimer lui-même au-dessus de la surface libre liquide : en H, l'appareil fonctionnera *comme une machine de compression*. Dans l'un et l'autre cas, l'action de la trompe sera lente, mais continue, et elle présentera l'avantage d'être automatique.

Parmi les appareils fondés sur ce principe, nous citerons :

1° La *petite trompe à eau d'Alvergniat* (à simple effet ou à double effet);
3° La *trompe à mercure* ou *aspirateur de Sprengel*;
4° La *machine soufflante*;
5° La *trompe aspirante et soufflante d'Alvergniat*.

209. **Petite trompe à eau d'Alvergniat.** — C'est une trompe spécialement destinée à faire rapidement un vide imparfait. L'appareil est entièrement construit en verre (fig. 214). La tubulure A est adaptée directement à un robinet de fontaine : l'écoulement prend un régime permanent; l'eau passe de l'ajutage conique A à l'ajutage conique D : l'aspiration se produit au point D, et l'appel d'air se fait de l'extérieur par la tubulure B. Si cette tubulure est adaptée à un récipient plein de gaz, on y fait rapidement le vide, jusqu'à une pression au plus égale à la tension maximum qu'a la vapeur d'eau à la température ambiante; mais on voit qu'on obtient pas ainsi un *vide sec*.

Trompe à double effet. — Le même appareil, enveloppé d'une garniture protectrice en fer et accouplé à un autre appareil identique constitue une trompe à double effet.

210. **Aspirateur de Sprengel : pompe-trompe d'Alvergniat.** — L'aspirateur de Sprengel est le type des trompes à mercure. La figure 215 représente le modèle le plus récent et le plus perfectionné d'aspirateur, construit par MM. Alvergniat et Chabaud, sous le nom de *pompe-trompe à mercure*.

Description. — L'appareil est tout en verre. Il se compose d'une machine ou pompe à mercure ordinaire, accouplée avec un aspirateur à six chutes de mercure. La *pompe* est représentée à la droite de la figure et comprend le mécanisme M, le récipient mobile R, les deux tubes T et T' reliés par un tube en caoutchouc, et enfin l'ampoule A, avec le tube abducteur *mn* d'une part, et les tubes d'aspiration *pqf* d'autre part. La *trompe* est représentée à la gauche de la figure, et comprend le récipient mobile R, le gros tube T et le petit tube latéral *ab*, reliés entre eux par le caoutchouc, ainsi que par l'ampoule A' à robinets *r* et *r'*, par le tube descendant *cd*, le double tube ascendant *dt* et *dt'*, enfin par les deux trompes à triple chute *t* et *t'* qui viennent aboutir à la cuvette C.

2° *Manipulation.* — Le récipient où l'on veut faire le vide est mis en communication avec l'appareil par le tube latéral *f*. On commence le vide avec la pompe proprement dite ; on l'achèvera ensuite à l'aide de la trompe.

Pour faire fonctionner la pompe seule, on tourne le robinet à trois voies *r* de manière à intercepter toute communication entre le tube T' d'une part, et la cuvette ainsi que le tube *ab* d'autre part. Les deux parties de l'appareil sont ainsi complètement séparées. On manœuvre alors la pompe à mercure comme on l'a indiqué précédemment : l'air est appelé par les tubes *f*, *q*, *p* dans l'ampoule A et il en est chassé par le tube abducteur *mn*, lequel débouche dans le mercure de la cuvette.

Pour achever le vide, on tourne d'abord le robinet *r*, de manière à intercepter la communication entre le récipient R et le tube T', et à l'établir, au contraire, entre R et la trompe proprement dite, par l'intermédiaire de l'ampoule A' et du tube *ab*. — D'ailleurs, la communication est également fermée *par le robinet r''*, entre le récipient R et la cuvette. Cela fait, on relève le récipient mobile à l'aide du mécanisme M jusqu'à une hauteur suffisante : le mer-

cure s'élève en même temps dans l'autre branche de ce système de vases communicants, et remonte lentement jusqu'au sommet *tt'* des trompes, en suivant le chemin A'*abcd* et *t* ou *t'* : de là il tombe goutte à goutte par les six branches descendantes, en produisant la succion de l'air qui arrive du récipient à gaz par les deux chemins *fh't* et *fh'ht*.

3° *Détails.* — A'. Il y a toujours une couche d'air plus ou moins épaisse qui adhère à la surface intérieure du tube en caoutchouc. Cet air, étant entraîné par le mercure ascendant, viendrait certainement gêner le fonctionnement de la trompe et limiter le degré du vide, comme une espèce d'espace nuisible.

L'ampoule A', disposée à l'entrée du tube *ab* (comme l'ampoule Bunten dans le baromètre à siphon), sert à saisir au passage et à recueillir l'air entraîné. Quand elle est remplie, on la vide par le tube abducteur que commande le robinet *r''*.

r. Dans l'aspirateur ordinaire, on était obligé de remonter à la main, jusqu'au sommet de la trompe, le mercure tombé dans la cuvette. Cette manœuvre fatigante est remplacée ici par la manœuvre plus facile de la pompe d'Alvergniat. On n'a qu'à tourner convenablement le robinet *r* et à abaisser le récipient mobile pour y faire passer tout le mercure de la cuvette.

A". L'ampoule A" *est une jauge de Mac Leod,*

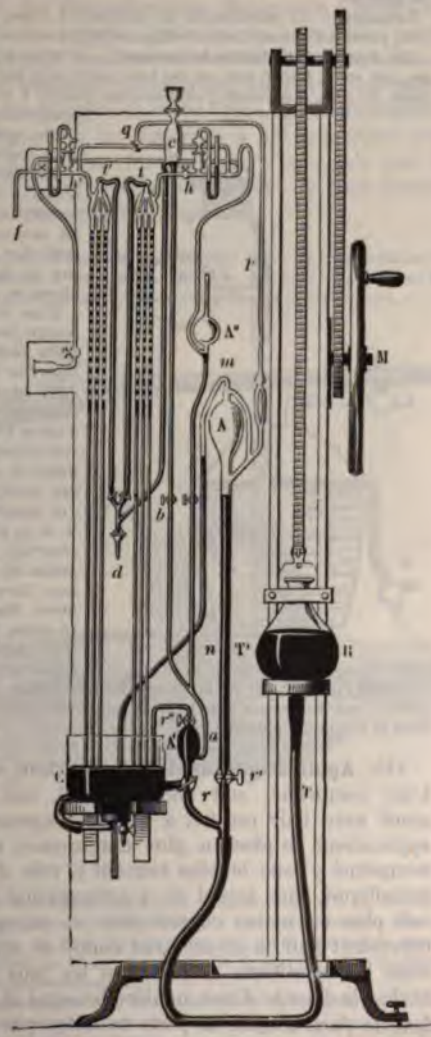


Fig. 215.

destinée à mesurer la faible tension du résidu gazeux quand la limite du vide est atteinte.

Remarque. — La substitution du mercure à l'eau, pour opérer la succion de l'air, permet d'obtenir dans le récipient à gaz un vide *absolument sec*.

211. **Aspirateur ordinaire de Sprengel.** — C'est un aspirateur à une seule chute, qui, par suite, fait le vide sec six fois moins vite que la pompe-trompe d'Alvergniat. De plus, il nécessite l'emploi d'une pompe à mercure ou autre machine pneumatique, c'est-à-dire d'un deuxième appareil distinct de la trompe pour opérer le vide.

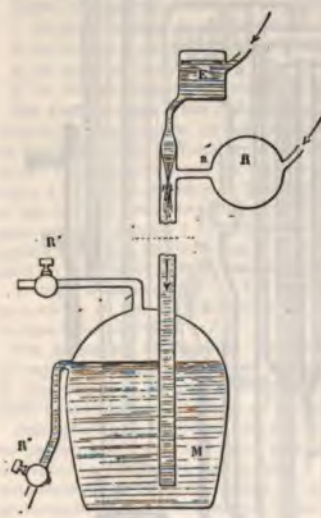


Fig. 216.

212. **Machine soufflante** ou **Trompe à eau.** — On peut se procurer d'une manière continue de l'air comprimé, au moyen d'un dispositif installé à poste fixe qu'on appelle la *trompe à eau* ou *machine soufflante* : nous allons en indiquer le principe.

L'eau de la ville ou l'eau d'une source voisine arrive par une conduite ordinaire dans une sorte de réservoir E (fig. 216), d'où elle tombe dans le tube E*m* et s'écoule par l'ajutage conique effilé *m*. L'appel d'air se fait en *m*, par un orifice qui communique ainsi soit avec un gazomètre R, soit avec l'atmosphère. Le gaz entraîné par le courant liquide s'en sépare dans le réservoir à eau M, et va s'accumuler dans le haut du réservoir inférieur. Là il se comprime lui-même au-dessus de la surface libre du liquide, et prend une force élastique croissante, jusqu'à ce qu'on lui ouvre une issue par le tube abducteur à robinet R' qui l'amène aux points du laboratoire où l'on veut l'utiliser. La pression acquise par la masse gazeuse est d'autant plus grande que le niveau dans le réservoir E est plus élevé au-dessus du niveau dans le réservoir inférieur.

213. **Applications de l'air comprimé et de l'air raréfié.** — L'air comprimé, soit employé seul, soit employé concurremment avec l'air raréfié, a depuis longtemps donné lieu à des applications de plus en plus nombreuses et intéressantes. L'air comprimé y joue le plus souvent le rôle d'une sorte de ressort métallique, dans lequel on a emmagasiné une provision de travail plus ou moins considérable et qu'on dépense ensuite, en détendant l'air, à un moment donné et sur un point déterminé, dans les conditions d'utilisation les plus favorables. Tantôt on réalise la détente d'une manière brusque et intermittente, comme *dans le fusil à vent*, la *poste* ou *télégraphe pneumatique*, les *horloges pneumatiques*, le *frein Westinghouse* ; tantôt on la produit

d'une manière lente, progressive et continue, comme dans les anciens *chemins de fer atmosphériques* (Kingstown, Saint-Germain), ou bien dans les récents systèmes de locomotion ou de transport à air comprimé (*voiture automobile Mekarski, locomotive Ribourt*); dans les *machines perforatrices*, qui ont été inventées pour le percement des tunnels du mont Cenis, du Saint-Gothard et de l'Arlberg; enfin, dans les appareils à air comprimé employés pour exécuter certains travaux sous l'eau, tels que le forage des puits de mine ou la fondation des piles de pont (*cloches à plongeur, scaphandres, appareils Triger*).

214. Fusil à vent. — Le *fusil à vent* est une des plus anciennes applications de l'air comprimé. L'*arquebuse à vent* a été quelque temps en usage dans les armées. Ce n'est plus aujourd'hui qu'un instrument de physique curieux.

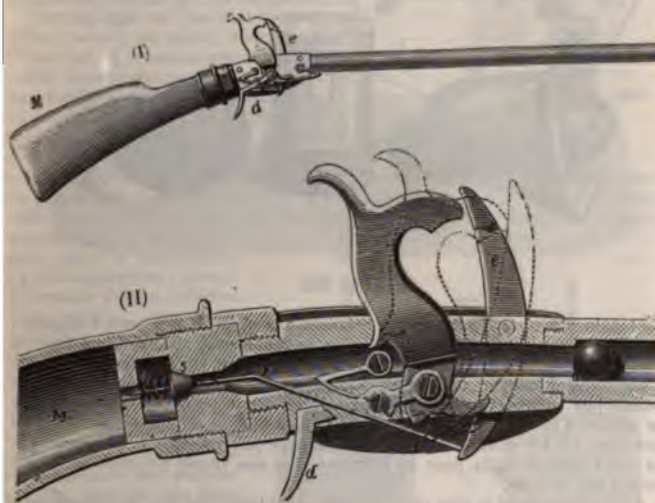


Fig. 217.

Le *fusil à vent* a l'aspect extérieur d'un fusil ordinaire (fig. 217, I); toutefois le canon en est plus long, parce qu'il y a intérêt à prolonger l'action de l'air comprimé : or la détente de l'air agit évidemment aussi longtemps que le projectile n'est pas expulsé de l'âme du canon. La figure 217, II, représente (en coupe) le mécanisme de l'instrument.

Le réservoir à air comprimé est dans la *crosse* même M, laquelle est creusée en forme de boîte métallique très résistante : on y comprime l'air à une pression au moins égale à 8 ou 10 atmosphères. La communication entre le réservoir et l'âme du canon, qui renferme la balle, peut être établie à volonté par

le jeu d'une soupape conique S. Au repos, la soupape est appliquée contre l'orifice du réservoir par l'air comprimé lui-même, et la communication est interrompue ; mais si l'on appuie sur la *détente d*, le *chien* s'abaisse sur un petit levier *e*, dont l'autre bras pousse alors la tige H', qui force la soupape à céder brusquement et à ouvrir un passage à l'air comprimé. Celui-ci se détend et chasse la balle, avec une vitesse qui dépend de la force élastique initiale.

Cette vitesse peut atteindre celle des balles de fusil ordinaire ; mais elle diminue rapidement, aux décharges suivantes, à mesure que le réservoir se vide. Il faut donc, après un petit nombre de coups, recharger le fusil, c'est-à-dire remplir de nouveau la crosse avec de l'air comprimé.

215. Poste pneumatique[1]. — Depuis quelques années[2] le service télégraphique dans l'intérieur des grandes villes s'effectue non pas à l'aide de l'électricité, mais à l'aide de l'air comprimé.

Les dépêches, au lieu d'être expédiées séparément, sont empilées par groupes de 30 à 40 dans des boîtes en tôle recouvertes de cuir. On expédie en même temps 10 de ces boîtes, formant, avec un piston, une sorte de *train* du poids

Fig. 218.

de 4 kilogrammes. (La figure 218 représente le piston et une boîte à dépêches ouverte.) Ce train circule non pas sur une voie ferrée, mais dans un *tube* en fonte, de 0,065 m de diamètre, et de 1 à 2 kilomètres de longueur, qui relie les deux stations par une voie souterraine. De la station de départ, il est *poussé* par un réservoir à air comprimé, en même temps qu'il est *aspiré*, de la station d'arrivée, par un réservoir à air raréfié. La différence des pressions exercées sur les deux faces du train ne dépasse pas trois quarts d'atmosphère, et cette poussée suffit pour lui communiquer une vitesse moyenne de 1 kilomètre par minute.

Aujourd'hui toute la ville et la banlieue sont desservies par un réseau complet de tubes pneumatiques, mais la distance entre deux stations consécutives reste limitée à 2 kilomètres environ, à cause de la diminution rapide, qui résulte de la distance, dans la tension de l'air comprimé[3].

1. Improprement appelée aussi *Télégraphe pneumatique*.

2. Ce nouveau système a été inauguré à Londres en 1854 ; il est établi à Paris depuis 1865.

3. La vitesse des trains varie en raison inverse de la racine carrée des longueurs, dans les tubes de même section. Ainsi la vitesse étant de 20 mètres par seconde dans un tube de 1000 mètres (sous la pression de 1 atmosphère) ne sera plus que de 6 mètres environ dans un tube de 10 kilomètres, de 4,50 m *dans un tube de 20 kilomètres.*

26. Horloges pneumatiques. — Depuis 1880, un réseau de conduites d'air comprimé distribue l'heure à Paris : il donne l'heure d'une horloge centrale (avec un léger retard, plus ou moins accusé suivant la distance) en divers points des places et boulevards, ainsi que dans des maisons particulières, où sont installées des horloges secondaires, dites *horloges pneumatiques*, reliées à l'horloge principale.

Le système complet comporte donc : 1° une usine centrale, qui comprend les machines de compression, les réservoirs à air comprimé, l'horloge *normale* ou *directrice* et le mécanisme distributeur ; 2° les horloges *secondaires* ou *réceptrices*, disséminées dans les divers quartiers ; 3° enfin la canalisation, qui propage, du centre à la périphérie, l'action de l'air comprimé.

L'*horloge-type* est une horloge ordinaire, munie, en outre, d'un excentrique qui, à l'instant précis où l'aiguille marque *chaque minute*, produit un effet de déclenchement, lequel met en jeu le mécanisme de distribution. Celui-ci consiste en une sorte de *boîte à tiroir* (analogue à celle des machines à vapeur), qui met, au moment voulu, la canalisation en communication avec de grands cylindres, dits *réservoirs à haute pression*, dans lesquels on maintient l'air comprimé à une pression constante de plusieurs atmosphères. L'air qui est lancé, à chaque minute, dans la canalisation, n'a d'ailleurs qu'un excédent de pression de sept dixièmes d'atmosphère ; cela suffit pour faire jouer le mécanisme des horloges réceptrices.

Fig. 219.

Celles-ci ne sont pas de vraies horloges ; ce sont des cadrans munis de deux aiguilles, qui s'avancent par un mécanisme tout particulier (fig. 219). Le flux d'air comprimé arrive par un tuyau C dans un petit soufflet S (fig. 220), renfermé dans un tambour métallique T. A l'état de repos, le soufflet est replié sur lui-même (fig. 220, I) ; le flux d'air vient le gonfler à chaque minute (fig. 220, II) et pousser en même temps une tige T qui est fixée à sa base supérieure. Le mouvement de cette tige T soulève un levier *l*, articulé en A (fig. 219), qui, par l'intermédiaire d'un rochet *r*, fait avancer d'une dent la roue dentée R. C'est l'*axe de cette roue qui porte l'aiguille des minutes* ; comme

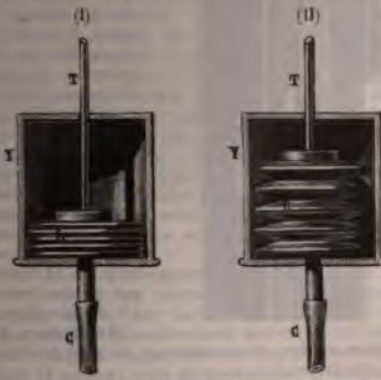


Fig. 220.

le jeu d'une soupape conique S. Au repos, la soupape est appliquée contre l'orifice du réservoir par l'air comprimé lui-même, et la communication est interrompue ; mais si l'on appuie sur la *détente d*, le *chien* s'abaisse sur un petit levier *e*, dont l'autre bras pousse alors la tige H', qui force la soupape à céder brusquement et à ouvrir un passage à l'air comprimé. Celui-ci se détend et chasse la balle, avec une vitesse qui dépend de la force élastique initiale.

Cette vitesse peut atteindre celle des balles de fusil ordinaire ; mais elle diminue rapidement, aux décharges suivantes, à mesure que le réservoir se vide. Il faut donc, après un petit nombre de coups, recharger le fusil, c'est-à-dire remplir de nouveau la crosse avec de l'air comprimé.

215. **Poste pneumatique**[1]. — Depuis quelques années[2] le service télégraphique dans l'intérieur des grandes villes s'effectue non pas à l'aide de l'électricité, mais à l'aide de l'air comprimé.

Les dépêches, au lieu d'être expédiées séparément, sont empilées par groupes de 30 à 40 dans des boîtes en tôle recouvertes de cuir. On expédie en même temps 10 de ces boîtes, formant, avec un piston, une sorte de *train* du poids

Fig. 218.

de 4 kilogrammes. (La figure 218 représente le piston et une boîte à dépêches ouverte.) Ce train circule non pas sur une voie ferrée, mais dans un *tube* en fonte, de 0,065 m de diamètre, et de 1 à 2 kilomètres de longueur, qui relie les deux stations par une voie souterraine. De la station de départ, il est *poussé* par un réservoir à air comprimé, en même temps qu'il est *aspiré*, de la station d'arrivée, par un réservoir à air raréfié. La différence des pressions exercées sur les deux faces du train ne dépasse pas trois quarts d'atmosphère, et cette poussée suffit pour lui communiquer une vitesse moyenne de 1 kilomètre par minute.

Aujourd'hui toute la ville et la banlieue sont desservies par un réseau complet de tubes pneumatiques, mais la distance entre deux stations consécutives reste limitée à 2 kilomètres environ, à cause de la diminution rapide, qui résulte de la distance, dans la tension de l'air comprimé[3].

1. Improprement appelée aussi *Télégraphe pneumatique*.

2. Ce nouveau système a été inauguré à Londres en 1854 ; il est établi à Paris depuis 1865.

3. La vitesse des trains varie en raison inverse de la racine carrée des longueurs, dans les tubes de même section. Ainsi la vitesse étant de 20 mètres par seconde dans un tube de 1000 mètres (sous la pression de 1 atmosphère) *ne sera* plus que de 6 mètres environ dans un tube de 10 kilomètres, de 4,50 m *dans un tube de 20 kilomètres.*

216. **Horloges pneumatiques.** — Depuis 1880, un réseau de conduites d'air comprimé distribue l'heure à Paris : il donne l'heure d'une horloge centrale (avec un léger retard, plus ou moins accusé suivant la distance) en divers points des places et boulevards, ainsi que dans des maisons particulières, où sont installées des horloges secondaires, dites *horloges pneumatiques*, reliées à l'horloge principale.

Le système complet comporte donc : 1° une usine centrale, qui comprend les machines de compression, les réservoirs à air comprimé, l'horloge *normale* ou *directrice* et le mécanisme *distributeur*; 2° les horloges *secondaires* ou *réceptrices*, disséminées dans les divers quartiers; 3° enfin la canalisation, qui propage, du centre à la périphérie, l'action de l'air comprimé.

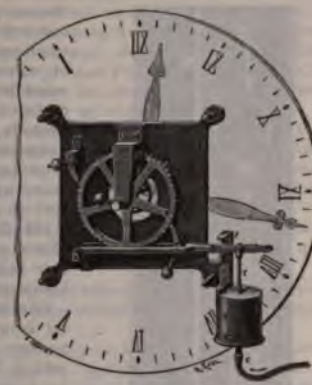


Fig. 219.

L'horloge-type est une horloge ordinaire, munie, en outre, d'un excentrique qui, à l'instant précis où l'aiguille marque *chaque minute*, produit un effet de déclenchement, lequel met en jeu le mécanisme de distribution. Celui-ci consiste en une sorte de *boîte à tiroir* (analogue à celle des machines à vapeur), qui met, au moment voulu, la canalisation en communication avec de grands cylindres, dits *réservoirs à haute pression*, dans lesquels on maintient l'air comprimé à une pression constante de plusieurs atmosphères. L'air qui est lancé, à chaque minute, dans la canalisation, n'a d'ailleurs qu'un excédent de pression de sept dixièmes d'atmosphère ; cela suffit pour faire jouer le mécanisme des horloges réceptrices.

Fig. 220.

Celles-ci ne sont pas de vraies horloges; ce sont des cadrans munis de deux aiguilles, qui s'avancent par un mécanisme tout particulier (fig. 219). Le flux d'air comprimé arrive par un tuyau C dans un petit soufflet S (fig. 220), renfermé dans un tambour métallique Y. A l'état de repos, le soufflet est replié sur lui-même (fig. 220, I) ; le flux d'air vient le gonfler à chaque minute (fig. 220, II) et pousser en même temps une tige T qui est fixée à sa base supérieure. Le mouvement de cette tige T soulève un levier *l*, articulé en A (fig. 219), qui, par l'intermédiaire *d'un rochet r*, fait avancer d'une dent la roue dentée R. *C'est l'axe de cette roue qui porte l'aiguille des minutes*; comme

le jeu d'une soupape conique S. Au repos, la soupape est appliquée contre l'orifice du réservoir par l'air comprimé lui-même, et la communication est interrompue ; mais si l'on appuie sur la *détente d*, le *chien* s'abaisse sur un petit levier *e*, dont l'autre bras pousse alors la tige H', qui force la soupape à céder brusquement et à ouvrir un passage à l'air comprimé. Celui-ci se détend et chasse la balle, avec une vitesse qui dépend de la force élastique initiale.

Cette vitesse peut atteindre celle des balles de fusil ordinaire ; mais elle diminue rapidement, aux décharges suivantes, à mesure que le réservoir se vide. Il faut donc, après un petit nombre de coups, recharger le fusil, c'est-à-dire remplir de nouveau la crosse avec de l'air comprimé.

215. **Poste pneumatique**[1]. — Depuis quelques années[2] le service télégraphique dans l'intérieur des grandes villes s'effectue non pas à l'aide de l'électricité, mais à l'aide de l'air comprimé.

Les dépêches, au lieu d'être expédiées séparément, sont empilées par groupes de 30 à 40 dans des boîtes en tôle recouvertes de cuir. On expédie en même temps 10 de ces boîtes, formant, avec un piston, une sorte de *train* du poids

Fig. 218.

de 4 kilogrammes. (La figure 218 représente le piston et une boîte à dépêches ouverte.) Ce train circule non pas sur une voie ferrée, mais dans un *tube* en fonte, de 0,065 m de diamètre, et de 1 à 2 kilomètres de longueur, qui relie les deux stations par une voie souterraine. De la station de départ, il est *poussé* par un réservoir à air comprimé, en même temps qu'il est *aspiré*, de la station d'arrivée, par un réservoir à air raréfié. La différence des pressions exercées sur les deux faces du train ne dépasse pas trois quarts d'atmosphère, et cette poussée suffit pour lui communiquer une vitesse moyenne de 1 kilomètre par minute.

Aujourd'hui toute la ville et la banlieue sont desservies par un réseau complet de tubes pneumatiques, mais la distance entre deux stations consécutives reste limitée à 2 kilomètres environ, à cause de la diminution rapide, qui résulte de la distance, dans la tension de l'air comprimé[3].

1. Improprement appelée aussi *Télégraphe pneumatique*.

2. Ce nouveau système a été inauguré à Londres en 1854 ; il est établi à Paris depuis 1865.

3. La vitesse des trains varie en raison inverse de la racine carrée des longueurs, dans les tubes de même section. Ainsi la vitesse étant de 20 mètres *par seconde dans un tube de* 1000 mètres (sous la pression de 1 atmosphère) *ne sera plus que de 6 mètres* environ dans un tube de 10 kilomètres, de 4,50 m *dans un tube de 20 kilomètres.*

des locomotives, à la traction des matériaux et au transport des voyageurs, dans lesquels l'air comprimé joue le même rôle que la vapeur d'eau.

Voiture automobile Mekarski. — En 1875, le tramway de la place de l'Étoile à Courbevoie était traîné par un de ces moteurs. L'appareil était installé sous le châssis même de la voiture, entre les roues. C'est un mécanisme analogue à celui des locomotives à vapeur, mais fonctionnant à l'air comprimé. Au lieu de chaudière à vapeur, la voiture emportait avec elle des réservoirs cylindriques, très résistants, dans lesquels on comprimait l'air à 25 atmosphères, à l'aide de pompes installées, à poste fixe, à l'une des stations. Ce qui constituait la nouveauté du système de M. Mekarski, c'était un *régulateur de pression*, à l'aide duquel l'air comprimé, sortant des réservoirs à une pression décroissante, entrait dans le mécanisme moteur à une pression constante. De plus, pour éviter le refroidissement dû à la détente du gaz, on avait soin de faire passer l'air comprimé dans un réservoir d'eau surchauffée à 150° avant de l'utiliser dans le moteur.

220. **Machines perforatrices.** — L'air comprimé a joué un rôle encore plus important dans les grands travaux de percement du Saint-Gothard, ainsi que dans les travaux antérieurs du mont Cenis.

On construisit donc pour cet usage, d'après une idée de MM. D. Colladon et de Caligny, des machines spéciales à percer, dites *machines perforatrices*, actionnées à l'aide d'air comprimé.

Les premières machines perforatrices, celles du mont Cenis, se composaient d'une dizaine de forets, en forme de *fleurets*, installés sur un même affût mobile sur des rails; un second chariot, qui était attelé à l'affût, portait des réservoirs à eau et à air comprimé. Chaque fleuret était animé de trois mouvements simultanés, indispensables à la nature du travail à exécuter : 1° un mouvement de va-et-vient longitudinal, produisant des chocs répétés sur la roche; 2° un mouvement tournant hélicoïdal, analogue à celui d'une vrille, produisant la pénétration; 3° un mouvement de progression, parallèle à l'axe de l'outil et proportionnel à la rapidité du percement. Ce triple mouvement était communiqué aux forêts par l'air comprimé.

La compression de l'air était obtenue à l'aide de machines de compression spéciales, dites *compresseurs*, qui empruntaient la force motrice nécessaire aux chutes d'eau du voisinage, en sorte que *la montagne était percée à l'aide de la force motrice de ses propres torrents.* La pression fournie aux machines était de 7 atmosphères; l'excédent d'air comprimé était lancé dans les galeries pour en entretenir l'aérage dans de bonnes conditions hygiéniques.

Après le mont Cenis, le massif du Saint-Gothard a été percé du nord au sud, entre les villages de Göschenen et d'Airolo, d'un tunnel à deux voies, plus long que le précédent. Les difficultés étaient plus grandes qu'au mont Cenis, parce que la masse de roches à extraire était plus considérable et les couches à traverser généralement plus dures à percer. Aussi se servit-on de machines et de procédés perfectionnés.

Ces procédés et ces machines, encore perfectionnés, ont été employés au percement du tunnel du col de l'Arlberg, qui traverse le massif du Vorarlberg, et ouvre une communication directe entre la Suisse et le Tyrol.

On peut se rendre compte des progrès successivement accomplis en comparant les durées successives de ces gigantesques travaux. Le percement du mont Cenis (12 230 m.) avait duré 14 années; celui du Saint-Gothard (14 912 m.) n'avait duré que 9 ans et demi; enfin celui de l'Arlberg (10 240 m.) a été achevé en moins de 3 ans et demi.

221. **Travaux sous-marins : cloche à plongeur, appareil Triger, scaphandre.** — C'est encore l'emploi de l'air comprimé qui a permis d'effectuer, avec une facilité relative et une sécurité *presque absolue*, les travaux sous l'eau des fleuves et des *mers ; soit de simples recherches*, telles que la pêche des

la roue porte soixante dents, chaque tour complet correspond à une heure, et provoque un mouvement correspondant de l'aiguille des heures.

217. **Freins automoteurs.** — **Freins Westinghouse.** — On a récemment appliqué l'air comprimé à la manœuvre des freins des wagons sur les voies ferrées. Une conduite d'air comprimé qui court tout le long du train communique avec les freins, qui sont automatiques et serreraient d'eux-mêmes s'ils n'en étaient empêchés d'une manière continue par l'action de l'air comprimé. Toute interruption, soit accidentelle, soit voulue, dans la conduite, supprime instantanément l'action de l'air comprimé et provoque le serrage automatique : grâce à ce mécanisme, un train lancé à toute vitesse est arrêté en quelques secondes.

Fig. 221.

218. **Chemins de fer atmosphériques.** — C'est plutôt une application de l'air raréfié que de l'air comprimé ; et elle n'a plus qu'un intérêt historique, car elle est tombée en désuétude[1].

Le chemin de fer atmosphérique le plus connu est celui qui a fonctionné en France, pendant quelque temps, sur la pente rapide (0,055 m par mètre) de la ligne du Pecq à Saint-Germain[2]. Au milieu de la voie ferrée était fixé un tube pneumatique, de 63 centimètres de diamètre, où l'on faisait le vide, en avant du train, à l'aide de machines pneumatiques, mues par la vapeur, à la station de Saint-Germain. Le train tout entier était entraîné par un piston relié au premier wagon et poussé en avant dans le tube par la pression atmosphérique. Le tube était muni, à sa partie supérieure, d'une fente longitudinale, par où passait la lame ou tige fixe reliant le piston au wagon (fig. 221). En avant du piston, c'est-à-dire du côté du vide, la fente restait fermée par une bande de cuir, garnie de courtes lames de tôle, faisant fonction de soupape[3] ; une série de galets, de grandeurs décroissantes, portés par le châssis du piston, soulevaient cette soupape à mesure que s'avançait la lame de jonction du piston.

Les dimensions du tube et des machines avaient été calculées de manière à donner à un train de 54 tonnes une vitesse de 1 kilomètre par minute, avec un excès de pression d'environ 1/3 d'atmosphère.

219. **Moteurs à air comprimé.** — Dans ces dernières années, on a construit de véritables moteurs pouvant servir, comme

1. Ce mode de traction était beaucoup plus coûteux que l'emploi des locomotives à vapeur.

2. Le premier construit (1848) fut celui de Kingstown à Dalkey, en Irlande, *sur un parcours de 3 kilomètres.*

3. *Voir les détails* de cette application, ainsi que de toutes les autres, dans le *Monde physique* de Guillemin (tome Ier).

ces rayons parallèles, mais aussi pour les rayons divergents, mais il n'y a d'intérêt qu'à considérer la première, qui on appelle spécialement aberration *principale*. Il résulte de ce phénomène que l'image d'un point lumineux très éloigné n'est pas un point lumineux unique : si l'on place un écran en F, on obtient un cercle lumineux de rayon FH. Comme il en est de même pour chaque point de l'objet, on ne peut avoir de celui-ci qu'une image confuse.

La distance FG entre les deux foyers principaux est appelée aberration *longitudinale*; la distance FH est l'aberration latérale.

403. Aplanétisme. — 1° *Lentilles aplanétiques.* — L'expérience prouve que si l'on accole une deuxième lentille à la première, les deux foyers G et F sont rapprochés de la lentille, et celui-ci plus que celui-là : il en résulte que l'aberration est diminuée par l'interposition d'une lentille supplémentaire. En choisissant convenablement, on peut détruire complètement l'aberration : on produit ainsi l'*aplanétisme* du système convergent, et cette lentille composée est dite *aplanétique*.

L'aplanétisme ne peut pas être obtenu avec une lentille unique; mais, en en choisissant convenablement les courbures, on peut en rendre l'aberration *minimum*. On démontre par le calcul, et l'on vérifie par l'expérience, que le minimum d'aberration est atteint, pour une lentille d'indice moyen égal à 1,5, lorsqu'on a entre ses deux rayons de courbure la relation

$$\frac{R}{R'} = n \cdot \frac{1 + 2n}{4 - n - 2n^2}$$

Pour une lentille en crown, dont l'indice est $\frac{3}{2}$, la relation devient $R' = 6R$.

Si l'on retournait une pareille lentille, son aberration deviendrait plus de *trois fois* plus grande. Cela montre l'inconvénient qu'il peut y avoir à retourner *les verres* dans les instruments d'optique.

2° *Emploi des diaphragmes.* — On peut atténuer l'aberration des lentilles ordinaires en plaçant devant leur surface des diaphragmes percés d'une ouverture centrale : de cette manière on laisse passer les rayons voisins du centre, et l'on arrête ceux qui tendent à se réfracter vers les bords. On se rapproche ainsi plus ou moins du cas des rayons centraux, et l'on évite l'aberration.

3° *Emploi des lentilles à échelons.* — On obtient un aplanétisme très suffisant dans la pratique par l'emploi des lentilles dites *à échelons*.

404. Lentilles à échelons. — Les *lentilles à échelons* suppriment les inconvénients des lentilles de grande ouverture, en particulier leur forte *aberration de sphéricité* et leur pouvoir absorbant, qui est fonction de leur épaisseur, et la cherté de leur construction. Imaginées par Buffon, elles ont été perfectionnées par Fresnel.

Elles sont formées d'une lentille plan-convexe C (fig. 408 et 409), encastrée dans une première série d'anneaux de verre, qui en constituent la partie centrale, et entourée d'une suite d'anneaux de verre A, B..., également plan-convexes, qui en constituent la périphérie. Chacun de ces anneaux a sa face plane située du même côté que la face plane de la lentille centrale, tandis que leurs faces opposées ont une courbure telle, que leurs divers foyers viennent se fondre au foyer de la lentille.

Fig. 408.

D'après Buffon, les anneaux sphériques de la périphérie doivent être *concentriques* à la portion centrale; mais Fresnel a prouvé que le système n'est aplanétique qu'à la condition que les arcs générateurs des anneaux n'aient pas le même centre[1].

1. Les différents *centres ne doivent même* pas être situés sur l'axe de la le

éponges, des huîtres perlières ou des épaves de naufrages ; soit de grands travaux d'ingénieur, tels que le forage des puits de mines ou le fonçage des piles de pont.

1° *Cloche à plongeur.* — L'origine et le premier modèle de ces appareils est l'ancienne *cloche à plongeur*. C'était une vaste boîte ou cloche à air, ouverte par le bas et hermétiquement close d'autre part, qu'on descendait sous l'eau avec l'outillage et les ouvriers, jusqu'à ce qu'elle reposât sur le fond, à la place où devait se faire le travail.

2° *Appareil Triger.* — Un premier progrès consista à envoyer de l'air de

Fig. 222.

l'extérieur dans la cloche, afin d'y renouveler l'atmosphère viciée. Un perfectionnement plus grand encore fut réalisé par l'ingénieur Triger [1]. Il eut l'idée d'envoyer de l'air *comprimé*, lequel non seulement alimente d'air respirable les ouvriers, mais leur permet de travailler presque à pied sec, en expulsant l'eau tout autour d'eux dans l'appareil.

C'est à l'aide d'un appareil Triger qu'ont été édifiées les quatre piles du pont de Kehl, et, plus récemment, celles du pont gigantesque de Saint-Louis sur le Mississippi.

Remarque. — Le passage de la pression extérieure à la pression intérieure, *qui est deux ou trois fois plus forte*, ne serait pas sans danger pour la santé des

1. En 1841.

ouvriers s'il se faisait brusquement. Aussi l'entrée ne se fait-elle pas directement de l'air extérieur dans le caisson, pas plus que la sortie. L'ouvrier pénètre d'abord dans une chambre latérale, qui est à la pression extérieure; il s'y enferme, ouvre un robinet donnant sur l'une des cheminées latérales et qui établit la communication et l'égalité de pression entre les deux compartiments voisins. Il peut alors pousser une porte, qui s'ouvre de l'extérieur à l'intérieur, et qui était précédemment fermée par l'excès de pression, et il pénètre dans la cheminée latérale, par où il descend au fond du caisson. La manœuvre inverse s'effectue pour la sortie.

3° *Scaphandre.* — Un perfectionnement plus simple de la cloche à plongeur est le scaphandre[1], appareil journellement employé par les plongeurs, soit dans nos ports pour les travaux sous-marins, soit dans les mers de l'Archipel pour la pêche des éponges. Il se compose (fig. 222) d'une sorte de casque, qui peut s'emboîter solidement sur les épaules du plongeur, et qui est en communication permanente avec une boîte à air, posée sur son dos comme un sac de soldat; un tuyau, que le plongeur entraîne avec lui, amène dans le réservoir de l'air comprimé (à une pression égale à celle qui s'exerce au fond de l'eau). L'air qui a été respiré peut s'échapper par des ouvertures convenablement disposées. Le plongeur peut voir et se conduire par d'autres ouvertures, hermétiquement fermées avec des glaces et protégées par des grilles. Une corde, attachée à sa ceinture, permet de le remonter à volonté, sur un signal convenu.

1. De σκάφος, bateau, et ἀνήρ, ἀνδρός, homme.

[redacted]

LIVRE V

COMPLÉMENTS : NOTIONS D'HYDRODYNAMIQUE
COMPRESSIBILITÉ DES LIQUIDES. — NOTIONS DE CAPILLARITÉ

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS D'HYDRODYNAMIQUE

PRINCIPE DE TORRICELLI ET APPLICATIONS. — POMPES ET SIPHONS.

222. **Principe de Torricelli : Énoncé et formule.** — Lorsqu'un liquide pesant est en équilibre dans un vase A, si on pratique une ouverture en un point O de la paroi, le liquide s'échappe, et en même temps l'équilibre des pressions est rompu. La vitesse que possède chaque molécule liquide, au moment où elle passe par l'orifice, est déterminée par le principe suivant, dû à Torricelli :

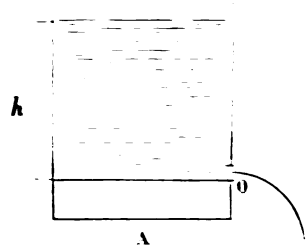


Fig. 225.

La vitesse d'un liquide qui s'échappe par un petit orifice percé en mince paroi est égale à celle qu'acquerrait un corps tombant librement dans le vide depuis la surface libre jusqu'au centre de l'orifice.

En appelant V cette vitesse, h la hauteur que possède le niveau à l'instant considéré au-dessus du centre de l'orifice (fig. 225), on a, d'après les lois de la chute des corps *dans le vide*,

$$V = \sqrt{2gh}. \qquad [1]$$

C'est ce qu'on appelle la *formule de Torricelli*, et l'énoncé ci-dessus constitue le *Principe* ou la *Règle de Torricelli*.

223. Démonstration du principe. — Torricelli s'était contenté d'une expérience fort simple pour vérifier sa formule. Il avait observé qu'un jet liquide sortant de l'orifice O suivant la verticale atteignait sensiblement la même hauteur que le niveau MN dans le vase (fig. 224).

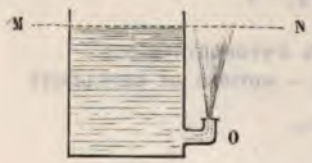


Fig. 224.

Daniel Bernoulli traita le problème par le calcul, en supposant : 1° que l'orifice était pratiqué dans une paroi infiniment mince ; 2° que son diamètre était infiniment petit par rapport à celui du vase ; 3° que les molécules liquides, qui s'échappent à chaque instant du vase, proviennent directement de la surface libre ; 4° que la pesanteur est la seule force qui intervienne dans l'écoulement.

En appliquant tout simplement le théorème du travail et des forces vives pour l'intervalle de temps très court où une petite masse m du liquide s'échappe du flacon, on arrive à la formule de Bernoulli :

$$[2] \qquad V = \sqrt{2g\left(h + \frac{p - p'}{d}\right)};$$

V est la vitesse d'écoulement à l'instant considéré, d représente le poids spécifique du liquide, p et p' représentent les pressions qui s'exercent sur le liquide, en haut à la surface libre et en bas à l'orifice, dans le milieu où se produit l'écoulement.

Dans le cas actuel, l'écoulement a lieu dans l'atmosphère : $(p - p')$ est donc le poids d'une colonne d'air ayant pour base l'unité de surface et pour hauteur la distance h de l'orifice à la surface libre. En appelant a le poids spécifique de l'air, dans les circonstances de température et de pression où l'on opère, la formule devient

$$[2\ bis] \qquad V = \sqrt{2gh\left(1 + \frac{a}{d}\right)}.$$

La fraction $\frac{a}{d}$ étant généralement négligeable par rapport à l'unité, on retrouve la formule de Torricelli : $V = \sqrt{2gh}$.

Autre formule. — On peut évaluer les pressions extérieures p et p' en colonnes du liquide qui s'écoule. En appelant H et H' les hauteurs des cylindres de ce liquide qui feraient équilibre aux pressions p et p' (par unité de surface), on a

$$p = Hd \qquad \text{et} \qquad p' = H'd.$$

En substituant ces valeurs dans la formule, elle devient

$$[3] \qquad V = \sqrt{2g(h + H - H')}.$$

224. Vérification expérimentale de la formule de Torricelli. — On peut démontrer la formule *à posteriori* par deux procédés, l'un fondé sous la forme que prend le jet (*ou veine liquide*) en s'échappant du vase, et l'autre fondé sur la

dépense, c'est-à-dire sur la quantité de liquide qui s'écoule dans un temps donné.

1° *Forme de la veine liquide.* — Soit V la vitesse d'une molécule liquide au moment où elle s'échappe de l'orifice.

Si celui-ci est pratiqué dans une paroi plane verticale, la vitesse V est horizontale. Aussitôt sortie, la molécule subit l'effet de la pesanteur. Elle est donc animée de deux mouvements simultanés, l'un uniforme, rectiligne et horizontal, provenant de la vitesse initiale V, et l'autre uniformément accéléré, rectiligne et vertical, provenant de l'action de la pesanteur.

La trajectoire du mouvement résultant est une *parabole*, ayant pour *sommet* le point de départ de la molécule, pour *tangente au sommet* la direction du mouvement uniforme et pour *axe* la direction du mouvement uniformément accéléré. Chacune des molécules liquides qui traverse l'orifice, en même temps que la précédente, se trouve dans les mêmes conditions, et décrit une parabole identique. L'ensemble de ces *trajectoires matérielles* constitue un volume parabolique qui est la *veine liquide*.

En mesurant l'*amplitude* (ou *portée*) a de la veine sur un plan tel que M'M, situé à une distance h' de l'orifice, on pourra en déduire la vitesse initiale V, et, en comparant cette mesure au nombre donné par la formule, on pourra vérifier celle-ci.

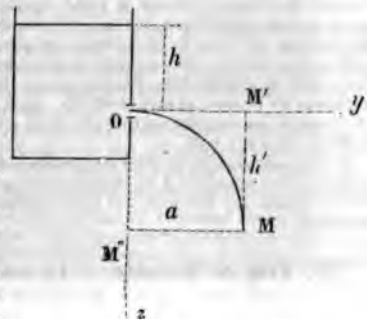


Fig. 225.

La relation qui donne V en fonction de a et de h' est précisément l'équation de l'une des paraboles qui constituent la veine. Établissons, par exemple, celle qui correspond au centre de l'orifice (fig. 225). Prenons pour axes des coordonnées la direction Oy de la vitesse initiale V et la direction verticale Oz. Soit M la position de la molécule au bout du temps t. On a évidemment :

$$\text{pour l'abscisse OM'} \ldots\ldots\ldots\ldots \quad y = Vt$$

$$\text{et pour l'ordonnée MM'} \ldots\ldots\ldots\ldots \quad z = \frac{1}{2} g t^2.$$

En éliminant t entre ces deux égalités, il vient

$$y^2 = 2 \frac{V^2}{g} z.$$

C'est l'*équation de la parabole*. En y donnant à z la valeur h' qui correspond au plan MM', on a la valeur a de l'amplitude :

$$a^2 = 2 \frac{V^2}{g} h', \qquad \text{d'où} \qquad V = a \sqrt{\frac{g}{2h'}}.$$

Il ne reste plus qu'à mesurer a et à comparer V avec la valeur théorique $\sqrt{2gh}$.

Cette mesure se fait aisément à l'aide d'un appareil très simple qui réalise le dispositif précédent[1]. *La vérification est très satisfaisante.*

1. *Voir le Traité d'hydraulique* de M. Dubuisson.

2° *Dépense. — Contraction de la veine liquide.* — On appelle *dépense* le volume liquide qui s'écoule pendant un certain temps. Il est facile de la calculer d'avance, en partant de la formule de Torricelli. En effet, si S est la section de l'orifice, θ l'intervalle de temps considéré, V la vitesse donnée par la formule, l'eau écoulée forme un cylindre ayant pour base S et pour longueur $V\theta$. On a donc

$$D = SV\theta = S\theta\sqrt{2gh}.$$

On vérifie aisément la formule, en pesant le liquide écoulé et divisant ce poids par la densité.

Les nombres ainsi obtenus sont toujours très différents des nombres théoriques : ils leur sont *notablement inférieurs*. Cette anomalie est due à une circonstance particulière dont nous n'avons pas tenu compte dans le calcul de la dépense théorique. C'est que la veine liquide est *conique* à la sortie du vase, et ne devient *cylindrique* qu'à une certaine distance ; or la section du cylindre qui succède au tronc de cône initial est plus petite que l'orifice (on l'appelle *section contractée*) : elle est égale à une fraction c de l'orifice, qu'on appelle *coefficient de contraction*. Pour un même liquide, c varie avec la forme et la grandeur de l'orifice et avec la charge. Ainsi, pour des orifices circulaires dont le diamètre est compris entre 2 cm et 16 cm et pour une charge inférieure à 6,80 cm, on a $c = 0,62$.

Si l'on tient compte de cette circonstance dans le calcul de la dépense, c'est-à-dire si l'on substitue à la surface S de l'orifice celle de la section contractée cS, on trouve des nombres qui sont sensiblement d'accord avec les mesures directes.

225. **Vase de Mariotte.** — Le *vase* (ou *flacon*) *de Mariotte* est un appareil qui permet d'obtenir l'écoulement constant d'un liquide qu'il contient. Il peut servir également à vérifier plusieurs conséquences du principe de Torricelli.

Fig. 226.

Il se compose simplement d'un flacon un peu grand, fermé par un bouchon que traverse un tube de verre ouvert à ses deux bouts (fig. 226). Sur la paroi du flacon sont alignées verticalement deux ou trois tubulures très courtes a, b, c, à orifice étroit ; on peut fermer chacune d'elles à l'aide d'un petit tampon de bois.

Fonctionnement. — On commence par remplir entièrement d'eau le vase et le tube, jusqu'en g. Nous supposerons que l'orifice inférieur de ce dernier vienne aboutir en l, dans l'intervalle des tubulures b et c. Il y a trois cas à considérer, suivant que l'on ouvre séparément l'un des trois orifices a, b et c. Le cas pratique, celui de *l'écoulement constant*, est le dernier. Les deux autres cas sont

purement théoriques et servent de vérification au principe de Torricelli.

1° *L'orifice b est seul ouvert.* — Si l'on ouvre d'abord la tubulure *b*, il y a écoulement, le niveau baisse dans le tube *g*, et dès que le niveau y est le même qu'en *b*, l'écoulement s'arrête. Ces phénomènes s'expliquent par l'excès de pression qui avait d'abord lieu en *b*, de dedans en dehors, excès de pression qui disparaît lorsque le niveau dans le tube *g* est le même qu'en *b*. En effet, avant que l'écoulement commençât, la pression sur tous les points de la tranche horizontale *be* n'était pas la même. En *e* elle se composait de la pression atmosphérique, *plus* le poids de la colonne d'eau *ge*, tandis qu'en *b* la pression est seulement égale à celle de l'atmosphère. Mais une fois que le niveau est le même en *e* et en *b*, il y a équilibre, parce que, dans le flacon et dans le tube, la pression est alors la même sur tous les points de la tranche *be*.

2° *L'orifice a est seul ouvert.* — Si l'on ferme alors la tubulure *b* et qu'on ouvre la tubulure *a*, il n'y a pas d'écoulement; au contraire, l'air rentre dans le flacon par l'orifice *a*, et l'eau remonte dans le tube *g* jusqu'à la tranche *ad*, de manière que l'équilibre soit rétabli et que la pression soit la même sur tous les points de la tranche horizontale *ad*.

3° *L'orifice c est seul ouvert.* — Les orifices *a* et *b* étant fermés, on ouvre l'orifice *c*. Dans ce cas, l'eau s'écoule d'abord, avec une vitesse décroissante, jusqu'à ce que le niveau s'abaisse dans le tube *g* jusqu'en *l*. A partir de cet instant, l'écoulement continue *avec une vitesse constante*, qui est donnée par la formule de Torricelli, $V = \sqrt{2gz}$ (en appelant z la hauteur *lh*). En même temps l'air entre bulle à bulle par l'orifice *l* et gagne alors la partie supérieure du flacon. Ce régime dure aussi longtemps que le niveau de l'eau dans le flacon n'est pas descendu au-dessous de l'orifice *l*.

Cet écoulement constant s'explique par ce fait que la charge, c'est-à-dire la pression qui s'exerce sur la tranche horizontale *mh*, est *invariablement égale* à la pression de l'atmosphère, augmentée de celle de la colonne d'eau *hl*. Calculons, en effet, cette charge à un instant quelconque, par exemple quand le niveau s'est abaissé jusqu'au plan *ad*. L'air qui a pénétré dans le flacon est alors à une pression $(H - dl)$; or la couche *mh* supporte en outre le poids de la colonne d'eau *dl*; donc la pression transmise sur la tranche *mh* est en réalité $H - dl + dl + lh$, c'est-à-dire $H + lh$.

Cette pression est encore la même lorsque le niveau s'est abaissé en *be*, et ainsi de suite tant que le niveau est plus haut que l'orifice *l* : la pression sur la tranche *mh est donc constante*, et par conséquent il en est de même de la vitesse d'écoulement. Mais, une fois que le niveau est descendu au-dessous de l'orifice *l*, cette pression et, en même temps, la vitesse d'écoulement décroissent continuellement.

Remarque. — On peut se servir de cet appareil pour produire l'écoulement régulier d'un gaz. Dans ce cas, il faut évidemment chasser le gaz de son réservoir en y faisant arriver l'eau qui tombe du flacon de Mariotte. Si l'on aspirait directement le gaz en faisant communiquer l'extrémité *g* du tube droit avec le gazomètre, on n'obtiendrait pas une vitesse d'aspiration constante, puisque la pression du gaz, aspiré dans le flacon, irait en diminuant continuellement.

226. Écoulement d'un liquide en contact avec une masse d'air limitée. — Un autre cas très intéressant de l'écoulement des liquides *est celui où leur surface libre*, au lieu d'être en com*munication directe avec l'atmosphère*, se trouve en contact avec

une masse d'air limitée, dont la force élastique est supérieure ou inférieure à la pression extérieure.

Si h_0 est la *charge* initiale, c'est-à-dire la distance verticale de la surface libre à l'orifice, l'écoulement commence avec une vitesse V_0, qui est déterminée par la formule de Bernoulli,

$$V_0 = \sqrt{2g\left(h_0 + \frac{p_0 - p'}{d}\right)},$$

où p_0 désigne la pression intérieure au début, et p' la pression extérieure.

Or, tandis que p' est constant, p_0 diminue continuellement, à mesure que le vase se vide, par suite de l'accroissement de volume de l'air confiné. Donc, en même temps que la charge h_0 initiale diminue et prend une valeur h, continuellement décroissante, la différence des pressions $(p_0 - p')$ diminue aussi, puis s'annule, puis devient négative. Quand elle a atteint la valeur absolue hd, la quantité sous le radical, et par suite la vitesse d'écoulement, est nulle : l'écoulement doit s'arrêter.

Calcul de la charge finale h_1. — Proposons-nous de chercher la charge finale. Soit p' $(= Hd)$ la pression extérieure (qui est constante), évaluée en colonnes du liquide; soit p_1 $(= H_1 d)$ la pression finale de l'air confiné. L'équation du problème sera $h + H_1 - H = 0$.

On exprime H_1 en fonction de H en appliquant la loi de Mariotte, et l'on arrive à une équation du 2e degré d'où l'on tire (en appelant l la longueur du vase et en supposant la section égale à l'unité),

$$h = \frac{H + l}{2} \pm \sqrt{\frac{(H + l^2)}{4} - Hh_0}.$$

Une seule des racines convient, c'est celle qui correspond au radical négatif, car l'autre est manifestement plus grande que l.

Application. — Ce calcul trouve son application dans la théorie complète d'une foule de petits appareils, tels que la *pipette*, l'*entonnoir magique*, la *bouteille inépuisable*, la *fontaine intermittente*, etc.

227. **Pipette.** — On appelle ainsi un petit instrument, très employé dans les laboratoires et dans le commerce, pour puiser un peu de liquide dans un récipient qu'on ne veut pas ou qu'on ne peut pas déplacer.

C'est un simple tube droit, en verre ou en fer-blanc, dont la forme est analogue à celle d'un aréomètre qui serait ouvert aux deux bouts (fig. 227). L'extrémité inférieure se termine par un bec effilé, et l'extrémité supérieure par un orifice à rebords.

On plonge la pipette dans le liquide, par son bec effilé, l'orifice supérieur étant ouvert. Le tube se remplit jusqu'au milieu du

ent, soit par simple communication, soit par aspiration cas des liquides lourds, comme le mercure. On retire nstrument du liquide, en posant le doigt sur l'orifice r. La pression atmosphérique, qui s'exerce à l'orifice , suffit pour maintenir le liquide dans la tige effilée. l'on vient à rendre l'air en soulevant le doigt, l'écoule- produit aussitôt, avec une vitesse initiale déterminée ormule de Bernoulli (223). Pour , il suffit de reboucher l'orifice : ques gouttes de liquide qui s'écou- ore, suffisent pour raréfier l'air au-dessus du liquide, au point r la vitesse d'écoulement, confor- au calcul précédent[1].

ontaine intermittente. — *Des-* — La *fontaine intermittente* est l'un globe de verre C (fig. 228) r un bouchon à l'émeri, et por- a partie inférieure, deux ou trois s étroites D par lesquelles se fait ent. Un tube de cristal, ouvert à mités, pénètre par l'une dans le et vient aboutir par l'autre près fice pratiqué au centre d'une cu- cuivre B qui porte tout l'appareil. *onnement.* — Le globe C étant 'eau aux deux tiers environ, le 'écoule d'abord par les orifices D; ession intérieure, en D, est égale le l'atmosphère, *plus* le poids de e d'eau CD, tandis qu'extérieu-

Fig. 227.

au même point, la pression est égale seulement à celle osphère. Ces conditions persistent tant que l'orifice infé- tube est ouvert, car, par suite de cette communica- tension de l'air à l'intérieur est égale à la pression de ère.

'orifice inférieur laissant écouler moins d'eau que n'en les tubulures D, le niveau s'élève peu à peu dans la et le tube finit par plonger entièrement dans le liquide. érieur ne pouvant plus alors pénétrer dans le globe C,

noir magique, la *bouteille inépuisable* ou *bouteille magique*, qui *vets plutôt que des instruments de physique*, dérivent de la pipette. *la description dans le Monde physique* ɔdOimnleiluen, tome Ier.

ou se trouve dans le cas d'un écoulement au contact d'une masse d'air limitée (226) : l'air s'y raréfie à mesure que l'écoulement continue, et il vient un moment où il y a égalité entre la pression totale intérieure et la pression extérieure. Alors l'écoulement s'arrête ; mais, la cuvette continuant à se vider, l'orifice inférieur du tube se trouve bientôt dégagé : l'air rentre et l'écoulement recommence.

Fig. 228.

229. **Pompes.** — Les pompes sont des machines qui servent à élever l'eau soit par aspiration, soit par pression, soit par les deux effets combinés. On les classe dans trois catégories :

1° Les *pompes aspirantes* ;

2° Les *pompes foulantes* ;

3° Les *pompes aspirantes et foulantes.*

Les différents organes ou pièces qui entrent dans la construction d'une pompe sont : le *corps de pompe*, le *piston*, les *soupapes* et les *tuyaux d'aspiration* et *d'ascension.*

Le *corps de pompe* est un cylindre creux et fixe, de métal ou de bois, dans lequel se meut le *piston*. Celui-ci est un cylindre de métal ou de bois, garni d'étoupe et glissant à frottement doux dans toute la longueur du corps de pompe. Les *soupapes* sont des disques de métal ou de cuir, servant à fermer alternativement les orifices qui font communiquer le corps de pompe avec les *tuyaux d'aspiration* ou *d'ascension*. Enfin, ceux-ci sont des tuyaux dans lesquels l'eau est d'abord aspirée jusqu'au corps de pompe, puis refoulée au-dessus du piston, pour être enfin chassée au dehors.

Soupapes. — Les soupapes les plus fréquemment employées sont la *soupape à clapet* (fig. 229) et la *soupape conique* (fig. 230). La première est un disque métallique fixé à charnière sur le bord de l'orifice qu'il doit fermer. Pour que la fermeture soit plus *complète, la face* inférieure du disque est garnie d'un cuir épais.

Quant à la soupape conique, elle consiste en un cône métal-

lique s'engageant dans une ouverture de même forme. Au-dessous

Fig. 229.

Fig. 230.

de celle-ci est une bride de fer, dans laquelle passe un bouton à tête fixé à la soupape. Ce dispositif limite le jeu de la soupape quand elle est soulevée par l'eau, et l'empêche de chavirer.

Remarque. — Il y a un grand intérêt, pour la facilité du fonctionnement, à ce que la section de la soupape et celle de l'orifice soient *aussi grandes* que possible. On diminue ainsi les frottements de l'eau sur les orifices qu'elle traverse.

230. **Pompes aspirantes.** — *Description.* — Tous les appareils de cette catégorie se composent essentiellement : 1° d'un corps de pompe cylindrique, portant à sa partie supérieure une tubulure latérale par laquelle l'eau s'écoule, et percé à sa base d'un *large* trou recouvert d'une soupape à clapet S, s'ouvrant de bas en haut (fig. 231) ; 2° d'un tuyau d'aspiration A, fixé d'un bout au corps de pompe, et plongeant de l'autre dans le liquide qu'on veut élever ; 3° d'un piston P porté par une tige à laquelle on imprime un mouvement de va-et-vient à l'aide d'une brimbale B. En son centre, le piston est percé d'un *large* trou que ferme une soupape à clapet O s'ouvrant de bas en haut.

Fig. 231.

Fonctionnement et *Théorie.* — Supposons que le piston soit d'abord au bas de sa course. Lorsqu'on l'élève, le vide tend à se faire en dessous, et la soupape O reste fermée par l'effet de la pression atmosphérique, *tandis que l'air du tuyau A, en vertu de son élasticité, soulève la soupape S, et passe en partie dans le*

corps de pompe. L'air étant ainsi raréfié, l'eau doit évidemment monter dans le tuyau *jusqu'à ce que la pression de la colonne liquide soulevée, ajoutée à la tension de l'air qui reste dans le tuyau, fasse équilibre à la pression atmosphérique qui s'exerce sur l'eau du puisard*. Lorsqu'on abaisse le piston, la soupape S se ferme par son propre poids, et s'oppose au retour de l'air dans le tuyau d'aspiration. L'air comprimé par le piston soulève la soupape O, et s'échappe dans l'atmosphère. Au deuxième coup de piston, la même série de phénomènes se reproduit, et, après quelques coups, l'eau pénètre enfin dans le corps de pompe. On dit alors que la pompe est *amorcée*.

Fig. 232.

A partir de ce moment, le jeu de l'appareil change : pendant la descente du piston, la soupape S se ferme, l'eau comprimée soulève la soupape O et pénètre au-dessus du piston, qui la soulève ensuite, en remontant jusqu'au *tuyau de déversement*. Alors il n'y a plus d'air ni dans le corps de pompe ni dans le tube d'aspiration, et l'eau, poussée par la pression atmosphérique, suit le piston dans sa course.

Hauteur maximum du tuyau d'aspiration : calcul approché. — On a vu que la pression atmosphérique ne peut soutenir que le poids d'une colonne d'eau de 10,33 m : donc le tube d'aspiration ne peut pas dépasser une hauteur limite de 10,33 m au-dessus du niveau de l'eau dans le puisard ; car, dans le cas contraire, *la pompe se désamorcerait*. Dans la pratique, la hauteur du tuyau d'aspiration est loin d'atteindre ce maximum. Cela tient à ce qu'il se produit au-dessous du piston des rentrées d'air qui s'ajoutent à la colonne d'eau soulevée pour équilibrer la pression *extérieure*. En outre, le piston ne s'applique jamais exactement *sur la base du corps* de pompe, et lorsqu'il est au plus bas de sa

course, il existe encore au-dessous de lui un *espace nuisible* rempli d'air à la pression atmosphérique. Aussi, en général, le tuyau d'aspiration n'a-t-il guère plus de 8 mètres.

231. **Pompe aspirante et élévatoire.** — Ainsi, l'eau est soulevée d'abord, par la pression atmosphérique, dans le tuyau d'aspiration de la pompe aspirante jusqu'à une hauteur qui ne saurait dépasser 8 à 9 mètres. Mais une fois que l'eau a passé par-dessus le piston, c'est la force ascensionnelle du piston qui élève l'eau, et la hauteur qu'elle peut alors atteindre ne dépend que de l'effort appliqué au piston, quelle que soit l'élévation du *tuyau de déversement*. Lorsque la pompe est disposée pour élever l'eau jusqu'à une grande hauteur, on lui donne le nom de *pompe aspirante et élévatoire* (fig. 232).

232. **Effort et travail nécessaires pour manœuvrer la pompe aspirante.** — On peut les calculer *à partir du moment où elle est amorcée*. Ils sont très différents pendant la descente et pendant l'ascension du piston.

1° *Descente du piston.* — Pendant cette période, la pression est sensiblement la même sur les deux faces du piston et ses effets se compensent. Tout l'effort de la manœuvre est donc employé à vaincre les frottements. C'est pourquoi il est si important d'atténuer autant que possible ceux du liquide sur les parois de l'ouverture du piston, en donnant à celle-ci *le maximum de largeur*.

2° *Ascension du piston.* — Dans ce cas, les pressions p et p' qui s'exercent sur les deux faces, sont notablement différentes; il faut donc développer un effort capable de vaincre la différence $p - p'$.

Soient S la section du piston (fig. 231), e son épaisseur, H la hauteur de la colonne d'eau capable de faire équilibre à la pression atmosphérique, z la hauteur variable du piston au-dessus du niveau du puisard, et h la hauteur constante de l'orifice de déversement au-dessus du même niveau, enfin D la densité du liquide (lequel est ordinairement de l'eau). La pression p, de *haut en bas*, sur la face supérieure du piston, est évidemment égale à la pression atmosphérique (qu'on peut représenter par SHD) augmentée du poids de la colonne d'eau soulevée. On a donc

$$p = \mathrm{SHD} + \mathrm{S}(h - z - e)\,\mathrm{D}.$$

La pression p', de *bas en haut*, sur la face inférieure, est de même

$$p' = \mathrm{SHD} - \mathrm{S}z\mathrm{D}.$$

La différence, laquelle mesure l'*effort* à développer, est

$$f = p - p' = \mathrm{SD}(h - e),$$

ou bien, en négligeant l'épaisseur e du piston par rapport à la distance totale du déversoir,

$$f = \mathrm{S}h\mathrm{D}.$$

Tel est *l'effort à développer* pendant la manœuvre : on voit qu'il est le même en tous les points de la course du piston, et qu'il ne dépend que des dimensions de l'appareil, ainsi que de la densité du liquide.

Quant *au travail, il est égal, par définition, au* produit de l'effort f par le chemin que parcourt son point d'application, c'est-à-dire par la longueur de la

course du piston. On a donc, en appelant l la longueur du corps de pompe,

$$T = fl = SlDh.$$

Interprétation du travail dépensé. — Remarquons que le produit SlD représente le poids d'un cylindre du liquide, égal à la capacité du corps de pompe (jusqu'à l'orifice de déversement), c'est-à-dire à celui que débite la pompe par chaque coup de piston. D'autre part, h représente la distance verticale qui existe entre le niveau du puisard et le lieu où l'on recueille l'eau de la pompe. Le produit $SlDh$ représente donc le travail qu'on dépenserait en montant directement le poids d'eau que débite la pompe à chaque coup de piston. Par conséquent, la pompe à eau, comme toutes les machines, *ne crée pas* de travail; elle ne peut que *transformer* du travail, et permet de le produire d'une manière plus commode et plus rapide.

233. **Pompe aspirante à volant.** — Afin de rendre la manœuvre plus rapide et plus aisée, on a substitué, dans beaucoup de pompes aspirantes, au mouvement du balancier, celui d'un volant à manivelle. C'est un perfectionnement mécanique analogue à celui qu'a apporté M. Bianchi dans la manœuvre de l'ancienne machine pneumatique à deux corps de pompe.

234. **Pompes foulantes.** — Dans les pompes foulantes, on n'utilise pas la pression atmosphérique; c'est par la pression directe d'un piston *plein* qu'on fait monter l'eau.

Le type ordinaire de pompe foulante est représenté en coupe par la figure 233. Elle diffère de la précédente en ce que son piston est plein, et qu'elle n'a pas de tuyau d'aspiration; le corps de pompe est plongé dans l'eau même qu'on veut élever; enfin sur le côté du corps de pompe est adapté un tuyau D qui est le *tuyau d'ascension*. La partie inférieure de ce tuyau est munie d'une soupape O, s'ouvrant de bas en haut, et la base du corps de pompe d'une soupape semblable S.

Lorsque le piston monte, la soupape S s'ouvre, soulevée par la poussée du liquide, et le corps de pompe se remplit. Puis, lorsque le piston descend, la soupape S reste fermée et l'eau, refoulée par le piston, soulève la soupape O, et s'élève par le tuyau D, à une hauteur qui n'a d'autres limites que la pression exercée par le piston et la solidité de l'appareil.

Calcul du travail. — L'effort nécessaire pour manœuvrer le piston se calcule comme précédemment. Ici il n'y a pas d'effort à développer pendant l'ascension du piston, car les pressions sur les deux faces sont alors sensiblement les mêmes. Mais, pendant la descente, la pression sur la face supérieure n'est que SHD, tandis que sur la face inférieure elle est $(SHD+ShD)$, en appelant h la hauteur de l'orifice de déversement au-dessus de la base du corps de pompe. *L'effort à développer* est donc ShD, et le travail à dépenser est $ShD.l$ ou $SlD.h$ *ou* Ph, *en représentant* par P le poids d'eau (SlD) expulsé à chaque coup de *piston : même conclusion* que précédemment (232).

Pompes aspirantes et foulantes. — La pompe aspirante ante élève l'eau à la fois par aspiration et par compression. s le type usuel (coupe, fig. 234), le piston est plein, et la lu corps de pompe est munie d'une soupape qui s'ouvre

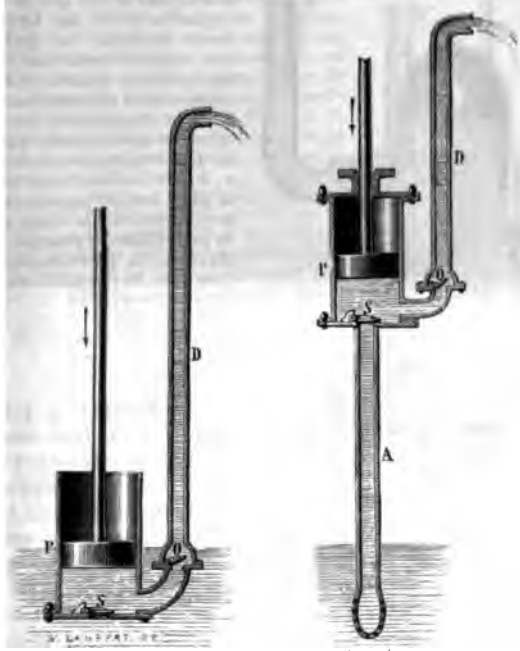


Fig. 233. Fig. 234.

en haut et ferme un tube d'aspiration A. Sur le côté du de pompe est un tube d'ascension D avec sa soupape O. la pompe fonctionne, l'eau, aspirée par le tuyau A toutes que le piston monte, est ensuite refoulée, lorsqu'il des- dans le tuyau D. La théorie de ces appareils est une con- ce de celles des deux systèmes précédents.

ompes oscillantes. — Pompe de Bramah. — Pour faciliter la manœuvre, nuant les frottements, on a supprimé le piston plein dans certaines dites *oscillantes. Ce nom leur vient de leur organe principal, qui est e métallique, oscillant autour d'un axe, de manière à jouer le rôle du une pompe ordinaire, aspirante et foulante.*

La figure 235 représente, en coupe, la pompe oscillante de Bramah. La pièce mobile est DD'; elle peut osciller autour de l'axe O', et on lui communique ce mouvement à l'aide d'une espèce de bielle reliée à une manivelle O*m*. Les tuyaux d'aspiration et de déversement sont disposés comme dans la pompe aspirante et foulante ordinaire : le déversement se fait par le haut et l'aspiration par le bas. Le corps de pompe lui-même est partagé en deux compartiments par une cloison verticale; chacun d'eux peut communiquer alternativement avec le tuyau d'aspiration, puis avec le tuyau de déversement, par le jeu de deux couples de soupapes, *a* et *a'*, D et D'; celles-ci sont fixées sur la pièce mobile même, et les autres placées sur le fond du corps de pompe. Dans sa position actuelle (fig. 235), la pièce mobile aspire l'eau dans le compartiment A et la chasse du compartiment A'; c'est le contraire qui se produirait dans la position symétrique de la pièce mobile.

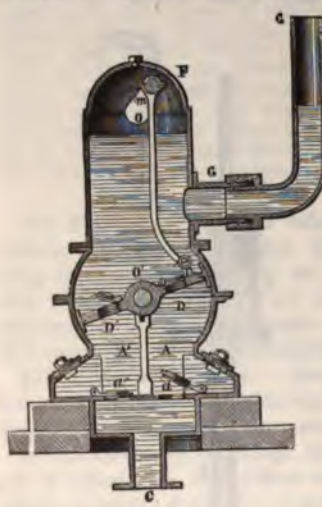


Fig. 235.

237. **Pompes à jet continu.** — Dans tous les appareils précédents, l'écoulement est intermittent, car il est interrompu soit lorsque le piston s'abaisse pour les pompes aspirantes, soit quand le piston s'élève pour les pompes foulantes, soit enfin aux *points morts*, c'est-à-dire aux points d'arrêt du piston, pour les pompes aspirantes et foulantes. On a cherché depuis longtemps à rendre l'écoulement ou le jet continu. On y est arrivé de deux manières :

1° Par le dispositif de la *pompe à double effet;*

2° Par le réservoir à air de la *pompe à incendie.*

1° *Pompe à double effet.* — C'est une pompe aspirante et foulante, dont les deux tuyaux, d'aspiration et de déversement, se subdivisent chacun en deux embranchements (fig. 236) qui aboutissent au corps de pompe par deux orifices munis de soupape A, A' et B, B'. Supposons que, dans sa position actuelle, le piston soit en train de monter : l'aspiration se produit par l'orifice A, tandis que la soupape A' est fermée par la colonne d'eau que soulève le piston; en même temps le refoulement de l'eau se produit par l'orifice B', tandis que la soupape B reste fermée sous la pression de l'eau contenue dans le tuyau de déversement. Pendant la descente, au contraire, l'aspiration se fait en A' et le refoulement *en B'.*

Le jet est donc à peu près continu, mais la manœuvre du piston exige nécessairement un effort double.

2° *Pompe à incendie.* — La pompe à incendie est une pompe foulante dans laquelle la régularité et la continuité du jet s'obtiennent à la fois : 1° par la réaction d'une masse d'air comprimée dans un réservoir spécial ; 2° par le jeu alternatif de deux pompes foulantes (fig. 237) accouplées, *m* et *n*, mues par un même balancier PQ, auquel huit hommes à la fois peuvent s'appliquer. Elles plongent dans une caisse (ou *bâche*) MN, qu'on maintient pleine d'eau tout le temps que l'appareil fonctionne. D'après la disposition des soupapes, on voit que lorsqu'une des pompes aspire l'eau de la bâche, l'autre la refoule dans un compartiment R qu'on nomme le *réservoir d'air*; de là, poussée par la réaction du gaz, l'eau passera par un orifice Z, dans un long tuyau de cuir qu'on dirige sur le foyer de l'incendie.

La vitesse de l'eau, à son entrée dans ce réservoir, étant plus grande qu'à sa sortie, son niveau s'élève au-dessus de l'orifice Z et l'air qui remplit le réservoir est comprimé. Par suite, toutes les fois que les pistons s'arrêtent, l'air comprimé, réagissant sur le liquide, le force à s'écouler d'une manière continue, jusqu'à ce que les pistons reprennent leur mouvement.

Pompe à vapeur. — Cette pompe à incendie peut être disposée de manière que le mouvement des pistons soit effectué par un petit moteur à vapeur. Elle est ordinairement munie d'une chaudière du système Field, qui produit en 8 minutes la vapeur d'eau nécessaire au travail de la pompe. Elle est assez puissante pour fournir un débit de 900 litres d'eau par minute et pour lancer un jet de 43 mètres de hauteur.

Fig. 236.

258. Machines élévatoires ou machines d'épuisement. — Quand il s'agit non plus des usages domestiques, mais de grands travaux industriels, tels que l'épuisement des mines ou le desséchement des lacs, les modèles de pompe que nous avons décrits plus haut seraient insuffisants. On emploie alors, sous le nom de *machines élévatoires* ou de *machines d'épuisement*, de véritables machines qui ne sont plus manœuvrées à bras d'homme, mais qui tantôt sont mues par l'eau, le vent ou la vapeur, et tantôt se meuvent elles-mêmes automatiquement. Les plus usuelles parmi ces machines se composent d'un certain nombre de pompes aspirantes et foulantes, convenablement accouplées. Chacune de ces pompes doit présenter une grande solidité d'organes, à cause des pressions et des résistances considérables qu'elles sont destinées à subir. Leur piston plein est ordinairement un long cylindre massif, analogue au piston des presses hydrauliques, qu'on appelle *piston plongeur*.

Machine de Marly. — Telle était la fameuse *machine de Marly*, construite sous Louis XIV, pour élever l'eau de la Seine jusqu'aux châteaux royaux de Marly et de Versailles. Elle se composait de 221 pompes accouplées, qui étaient actionnées par 14 roues hydrauliques, établies sur le fleuve même, en un point où la rapidité du courant suffisait pour donner la vitesse et le travail nécessaires. — Aujourd'hui, la *nouvelle machine* de Marly se compose seulement de 25 *pompes, mues par 5 roues hydrauliques*, et elle débite une quantité d'eau *beaucoup plus grande que l'ancienne machine.*

Machine de Fontainebleau. — Une machine du même genre, établie à une centaine de mètres de la Seine, alimente d'eau la ville de Fontainebleau mais elle est mue à l'aide d'un moteur à vapeur.

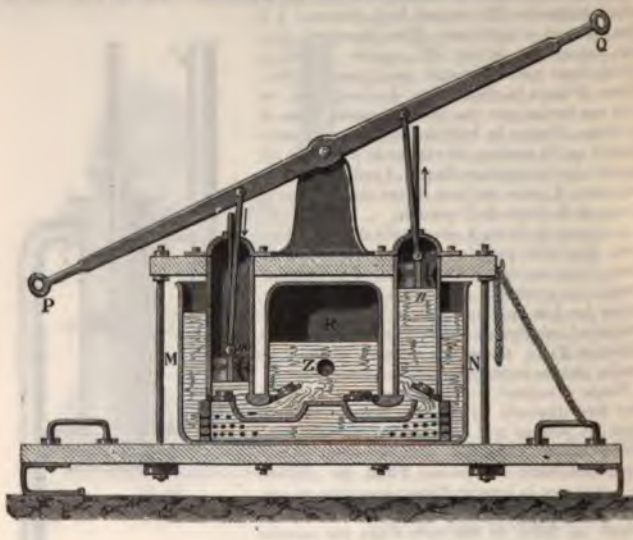


Fig. 237.

D'autres machines d'épuisement (machine de Schemnitz) fonctionnent plus lentement, mais *automatiquement*. Elles sont fondées sur un tout autre principe que les pompes.

239. **Fontaine de Héron.** — Cet appareil[1] se compose de deux réservoirs de verre M et N (fig. 238) reliés entre eux par deux tubes droits en cuivre A et B. Le réservoir supérieur est surmonté d'une cuvette en cuivre D, et l'ensemble repose sur un trépied. La cuvette est mise en communication avec la partie inférieure du ballon N par le long tube B, tandis que le tube A fait communiquer entre eux les deux ballons. Enfin, un troisième tube plus petit traverse le fond de la cuvette et se rend à la partie inférieure du ballon M. Ce dernier tube peut s'enlever à volonté : on le retire pour introduire une certaine quantité d'eau dans le ballon M; puis on le replace et l'on verse de l'eau dans la cuvette. Le liquide descend, par le tube B, dans le ballon inférieur et en chasse l'air,

1. *L'invention en est* attribuée à Héron d'Alexandrie, 120 ans av. J.-C.

qui vient s'accumuler dans le ballon supérieur; cet air ainsi comprimé réagit sur l'eau et la fait jaillir par le tub l qu'on munit d'un ajutage. Le liquide devrait s'élever, au-d niveau en M, à une hauteur égale à la différence de niveau dans les deux ballons; mais la hauteur du jet est notablement moindre, à cause de la résistance de l'air et du frottement de l'eau contre les tuyaux.

On peut donner d'autres s à la fontaine de Héron.

240. Machine de Schemnitz. — il a été construit à Schemnitz (Hongrie) pour servir à l'épuisemen s. Il fonctionne automatiquement, com taine de Héron (fig. 239). Un premie R (correspondant au vase N de la figu iveau de l'orifice du puits de min ant d'eau, provenant d'une

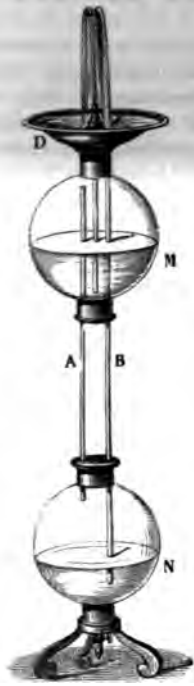


Fig. 238.

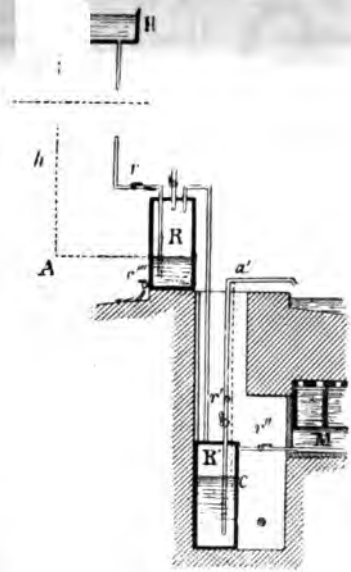


Fig. 239.

chute H, qui est élevée au-dessus du sol d'une hauteur *h* supérieure à la profondeur du puits; là s'effectue la compression de l'air qui doit servir de moteur. Cet air comprimé se rend, par des tuyaux de *conduite*, dans un deuxième réservoir R', situé au *fond du puits, et où viennent se* rassembler, par le tuyau

à robinet r'', les eaux provenant des mines M qu'il s'agit d'épuiser (R' correspond au vase M). Quand la tension de l'air y est devenue suffisante, il se détend, en comprimant l'eau, et en l'expulsant par un tuyau abducteur ($r'a'$ correspondant à l'ajutage vertical de la cuvette supérieure, fig. 238). Des robinets convenablement placés, r, r', r'' et r''', permettent de régler la marche de la machine, en fermant et en ouvrant successivement les réservoirs à eau et à air comprimé.

Remarque. — On voit que l'appareil fonctionne automatiquement par l'intervention de l'air comprimé. On aurait donc pu le citer également comme application de l'air comprimé.

241. Siphons. — On appelle *siphons* des instruments, très employés dans les laboratoires et dans l'industrie, pour transvaser les liquides d'un récipient dans un autre.

Le siphon ordinaire consiste simplement en un tube recourbé à branches inégales (fig. 240).

Fig. 240.

Fonctionnement. — Pour se servir du siphon, on commence par l'*amorcer*, c'est-à-dire par le remplir de liquide. Pour cela, on le retourne, et on l'emplit directement; puis, fermant momentanément ses deux orifices, on le place de manière que ce soit la petite branche qui plonge dans le liquide à transvaser. Ou bien, l'on met tout d'abord le siphon en place, puis on aspire avec la bouche, par l'orifice B, l'air qui est dans l'appareil : le vide se faisant alors dans celui-ci, le liquide du vase C est refoulé dans le tube par l'effet de la pression atmosphérique, et le remplit.

Lorsque le liquide à transvaser est un liquide corrosif, on emploie un siphon à trois branches. Tantôt cette troisième branche est un tube latéral M (fig. 241), par l'orifice duquel on aspire l'air (en ayant soin de fermer en même temps l'orifice P). Tantôt cette branche additionnelle est un tube soudé à la grande branche, et terminé par un petit ballon de verre (fig. 242). En chauffant doucement celui-ci, l'air s'y dilate et s'échappe en assez grande quantité pour que le siphon s'amorce ensuite de lui-même par suite du *refroidissement* et de la diminution de pression qui en résulte.

Par quelque procédé que le siphon ait été amorcé, l'écoulement

se continue de la petite branche vers la grande, tant que la première plonge dans le liquide.

Théorie élémentaire. — Expliquons pourquoi cet écoulement a lieu. D'une part, la force p qui presse le liquide en M (fig. 240) et le sollicite à s'écouler dans la direction CMB, est égale à la pression atmosphéri (HD), *moins* le poids (hD) d'u colonne d'eau, dont la haut *verticale* est DC ($=h$). D'au part, il existe une force c traire p', qui sollicite le liqu dans la direction BMC, et est égale au poids de l'at sphère HD, *moins* celui (h d'une colonne d'eau ayant pour hauteur verticale AB ($=h'$). Or

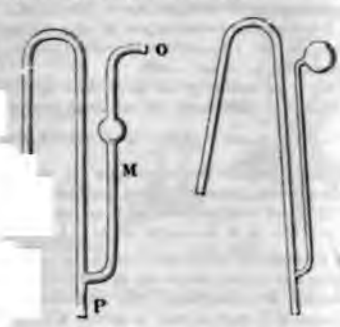


Fig. 241. Fig. 242.

h' étant plus grand que h, il en résulte que la pression p' est plus petite que p. C'est donc celle-ci qui l'emporte, et qui pousse la tranche liquide dans le sens CMB et l'écoulement doit avoir lieu en vertu de la différence de ces deux forces $f=(h'-h)$D. Et, comme la poussée est la même sur toute tranche liquide située en un point quelconque du siphon, le liquide s'écoulera en bloc, et pour ainsi dire d'un seul morceau.

La vitesse d'écoulement est déterminée par la formule de Torricelli $V=\sqrt{2g(h'-h)}$. Par suite, *la vitesse d'écoulement est d'autant plus grande que la différence de niveau entre l'orifice* B *et la surface du liquide dans le vase* C *est plus grande.*

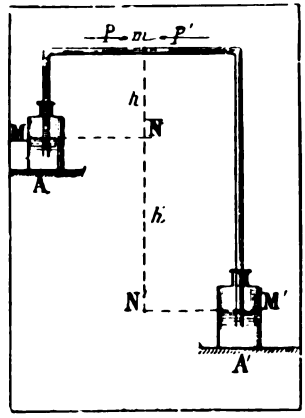


Fig. 243.

242. Théorie complète du siphon. — On peut faire la théorie du siphon en le supposant placé dans un milieu dont la densité d ne soit pas négligeable par rapport à la densité D du liquide à transvaser. Supposons le *siphon amorcé, et considérons* une tranche liquide m, située *à un niveau quelconque dans le siphon* ; soient h et h' les distances

verticales de cette tranche aux surfaces libres MN et M'N' des vases A et A' (fig. 243); enfin, soit ϖ la pression par unité de surface que le milieu ambiant, de densité d, exerce au niveau de la surface libre MN : il résulte des principes fondamentaux de l'hydrostatique que la pression exercée, au niveau M'N', sera supérieure à ϖ et égale à $\varpi + (h' - h)\,d$.

Évaluons les poussées p et p' que supporte la tranche m, du côté de chaque vase. Soient s la section de cette tranche et D la densité du liquide. On a évidemment $p = \varpi s - shD$.

On a de même $p' = [\varpi + (h' - h)\,d]\,s - sh'D$.

Soit f la différence de ces deux poussées, on a

$$f = \varpi s - shD - [\varpi + (h' - h)\,d]\,s + sh'D = s\,(h' - h)\,(D - d).$$

Cette formule renferme tous les cas particuliers que peut présenter l'usage des siphons, dans un milieu ambiant quelconque.

1° *d est négligeable vis-à-vis de* D. — C'est le cas ordinaire; on a alors $f = s\,(h' - h)\,D$, la *charge* est $h' - h$, et la vitesse d'écoulement est fournie par la formule de Torricelli $V = \sqrt{2g\,(h' - h)}$. On voit que la vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la distance verticale des niveaux (et non pas à la différence des branches); elle s'annulera lorsque, par suite de l'écoulement, le niveau M'N' aura atteint le niveau MN.

2° *d n'est pas négligeable, mais est inférieur à* D. — C'est le cas d'un liquide s'écoulant dans un milieu fluide, de densité inférieure à la sienne. Le terme $(D - d)$ est positif, ainsi que la force f. Cela signifie que la poussée p est plus forte que la poussée p' : l'écoulement a donc lieu du vase supérieur au vase inférieur, avec une vitesse proportionnelle à

$$\sqrt{h' - h}.$$

Fig. 244.

3° *d est supérieur à* D. — Ce serait le cas d'un liquide s'écoulant dans un autre liquide plus dense. Alors le terme $(D - d)$, et par suite la force f, sont *négatifs*. Cela veut dire que la poussée p' l'emporte sur la poussée p; l'écoulement aura lieu *du vase inférieur* A' *au vase supérieur* A.

Vérification. — On peut réaliser cette curieuse expérience en réunissant deux vases A et A', pleins de pétrole, par un siphon, qu'on amorcera dans un vase extérieur plein d'eau (fig. 243).

243. Siphon à écoulement constant. — D'après ce qui précède, pour que la vitesse *d'écoulement soit constante*, il faut que la distance verticale des *deux niveaux du liquide*, dans les deux branches, soit toujours

la même. On réalise cette condition à l'aide d'un dispositif très simple, indiqué par Héron d'Alexandrie. Le siphon est maintenu en équilibre au moyen d'un flotteur *a* et d'un poids *p* (fig. 244), de manière qu'à mesure que le niveau baisse dans le vase H, le siphon descend avec lui ; la différence entre les hauteurs *ab* et *bc* demeure donc invariable, et, par suite, la vitesse d'écoulement est constante.

Fig. 245.

244. Siphon intermittent ou **Vase de Tantale.** — Le *siphon intermittent*, ainsi que son nom l'indique, donne un écoulement qui n'est pas continu. Ce siphon est disposé dans un vase de manière que la branche la

Fig. 246.

plus courte *s'ouvre près du fond, tandis que* la plus grande tra*verse ce fond et va déboucher au dehors* (fig. 245). Le vase étant

alimenté par une source d'eau constante, le niveau s'y élève peu à peu, et en même temps dans la petite branche, jusqu'au sommet du siphon. Celui-ci s'amorce alors par l'effet de la pression du liquide, et l'écoulement a lieu. Si l'appareil est disposé de manière que le débit du siphon soit plus grand que celui du tube d'alimentation, le niveau baisse dans le vase, et la petite branche émerge bientôt : alors le siphon se *désamorce*, et l'écoulement est interrompu. Mais, le vase continuant à être alimenté par la source constante, le niveau s'élève de nouveau, et la même série de phénomènes se renouvelle périodiquement.

245. **Fontaines intermittentes naturelles.** — C'est un phénomène naturel qu'on observe dans plusieurs contrées. Il y a de ces fontaines qui, après avoir donné de l'eau pendant plusieurs jours ou plusieurs mois, s'arrêtent tout d'un coup pendant un intervalle plus ou moins long, puis recommencent à couler. Pour d'autres, ces périodes successives d'écoulement et de repos se renouvellent plusieurs fois par heure. On peut expliquer aisément ce singulier phénomène, en assimilant la fontaine à une sorte de vase de Tantale, de grandes dimensions, constitué par une série de cavités et de conduites souterraines (fig. 246). Le réservoir d'eau se remplit, plus ou moins vite, par l'apport des eaux provenant de sources voisines, et commence à se vider dès que le siphon naturel, formé par les fissures du sol, est amorcé. L'écoulement s'arrête quand le siphon est désamorcé par suite de la rentrée de l'air, et il reprend dès que l'amorçage est rétabli par l'arrivée des eaux extérieures.

CHAPITRE II

COMPRESSIBILITÉ DES LIQUIDES.

246. **Coefficient de compressibilité.** — Après l'expérience des académiciens de Florence, les liquides furent longtemps regardés comme incompressibles. Canton, en 1761, montra qu'ils étaient cependant compressibles et le fait, vérifié peu après par Perkins, fut dès lors admis. Depuis, cette compressibilité a été étudiée par plusieurs physiciens, Œrsted, Colladon et Sturm, Regnault, Grassi, M. Cailletet, et récemment par M. Amagat.

Soient V et V′ le volume d'un liquide sous les pressions P et P′, la diminution de volume V — V′ peut être estimée en fonction de l'augmentation de pression par la relation

$$V - V' = KV(P' - P), \quad \text{d'où} \quad K = \frac{1}{V}\frac{V - V'}{P' - P}.$$

K est le *coefficient de compressibilité* : c'est la variation que subirait l'unité de volume pour une augmentation de pression d'une atmosphère, en supposant K constant entre les limites P et P'.

En réalité, comme nous le verrons plus loin, ce coefficient varie avec la pression et avec la température. Par suite, dans ces relations et dans celle qui s'en déduit de suite,

$$V' = V[1 - K(P' - P)],$$

K est le coefficient moyen entre P et P'; si ces limites sont assez rapprochées, on pourra dire qu'il est le coefficient sous la pression P_1, moyenne entre P et P'.

247. Piézomètre et expériences d'Œrsted. — Œrsted a étudié la compressibilité des liquides à l'aide du *piézomètre*[1]. Cet appareil se compose d'un cylindre de verre très épais (fig. 247), mastiqué à sa base dans un pied de cuivre et à sa partie supérieure dans une garniture de cuivre. Celle-ci porte un entonnoir à robinet R, servant à le remplir d'eau, et un cylindre dans lequel on produit la pression au moyen d'un piston qu'on manœuvre à l'aide d'une vis P. Le liquide à étudier est renfermé dans un réservoir de verre A qui se termine par un tube O, recourbé et divisé, plongeant dans un bain de mercure. Quand on comprime, le mercure s'élève dans ce tube, ce qui permet d'apprécier la diminution de volume. On voit près du réservoir A un tube vertical B, placé contre une échelle divisée; ce tube est primitivement rempli d'air et plonge aussi dans le bain de mercure. Pendant la compression, cet air se comprime, le mercure s'élève dans le tube et indique par sa réduction *de volume* la pression qui a été

Fig. 247.

1. De πιέζειν, presser, et μέτρον, mesure.

atteinte : c'est une sorte de manomètre à air comprimé. Les liquides s'échauffant par compression, il faut, avant de faire chaque lecture, attendre que la température (indiquée par un thermomètre qui n'a pas été figuré) ait repris sa valeur initiale.

Contrairement à ce que pensait Œrsted, il faut tenir compte de la variation de volume du réservoir renfermant le liquide : on sait maintenant qu'il se contracte légèrement. Cette correction a donné lieu pendant longtemps à des incertitudes et à des erreurs qui rendent difficile la comparaison des résultats obtenus. On peut en juger par les résultats consignés au tableau suivant, donnant les valeurs de K d'après divers expérimentateurs.

	COEFFICIENTS DE COMPRESSIBILITÉ POUR DES PRESSIONS					
	NE DÉPASSANT PAS UNE DIZAINE D'ATMOSPHÈRES				ENTRE 1 ET 100 ATMOSPH.	
	Grassi (Méthode de Regnault)		*Jamin*		*Amagat*	
	Temp.	0,000	Temp.	0,000	Temp.	0,000
Mercure	0°	0029	15°	00187	15°	0059 (1 à 50 atm.)
— (Regnault). .	. .	0036	. .	. . .	. .	. . .
Éther ordinaire . .	0°	1110	0°	1090	0°	1590
Alcool méthylique .	13°	0913	. .	. . .	0°	0959
— éthylique . .	7°	0881	0°	0835	0°	0929
— propylique .	. .	. . .	. .	. . .	0°	0808
— allylique . .	. .	. . .	. .	. . .	9°	0820
Sulfure de carbone.	. .	. . .	14°	0625	0°	0720 (200 atm.)
Chloroforme. . . .	12°	0648	Acétone.		0°	0949
Eau	0°	0503	Chlor^re d'éthyle .		0°	1270
Eau de mer	17°	0436	Bromure — .		10°	1095
$SO^3, 2HO$	14°	0242	Iodure — .		10°	0887
$SO^3, 10HO$.	14°	0515	Chlorure de phosphore.		10°	0818

248. **Lois de la compressibilité des liquides.** — *Expériences de M. Amagat.* — M. Amagat a étudié la compressibilité des liquides dans des limites très étendues de température et de pression.

Appareil. — La figure 248 représente l'un de ses appareils, celui avec lequel il a opéré entre 0 et 50° et sous des pressions dépassant 3000 atmosphères. Le dispositif rappelle sous certains rapports celui d'Œrsted. Le cylindre de verre est remplacé ici par un cylindre d'acier fretté GG'G' de 18 centimètres de diamètre et de 1,20 m de longueur ; il est placé dans un grand manchon de cuivre III, rempli de glace ou traversé par un courant d'eau à température constante. Le liquide à étudier est renfermé dans un piézomètre de verre por-

tant à sa partie inférieure un petit cylindre plein de mercure dans lequel il plonge, et qui est plongé lui-même dans du mercure placé dans le cylindre GGG'. Quand on produit la pression, le mercure monte dans la tige et vient successivement toucher une série de petits fils de platine soudés latéralement dans cette tige, et reliés par un fil conducteur isolé qui sort de l'appareil par la pièce F; la disposition est telle, qu'un galvanomètre indique exactement le moment où le mercure vient toucher les fils successifs; ainsi se trouve faite la lecture des volumes. La pression est produite d'abord par une pompe injectant de l'eau qui arrive par le pointeau E; à partir d'une certaine pression on ferme le pointeau, et on continue à comprimer avec le dispositif vissé à la partie supérieure, et dans lequel un cylindre d'acier P, poussé par une vis V mue par un quadruple bras de levier T, chasse devant lui une calotte de cuir embouti C, dessinée à part.

Les pressions étaient mesurées au moyen d'un manomètre à piston libre, qui sera décrit plus loin, et qui communiquait avec le cylindre au moyen d'un raccord, vissé au niveau des pièces E et F, et qui n'a pu être figuré.

Pour les pressions inférieures et pour les températures s'élevant jusqu'à 200°, M. Amagat a suivi des méthodes totalement différentes.

L'appareil qui vient d'être décrit, et qui dans un grand nombre d'expériences peut servir comme producteur de très hautes pressions, a également servi à M. Amagat dans ses recherches sur les gaz (172, 4°); dans ce cas la forme seule du piézomètre en verre était changée.

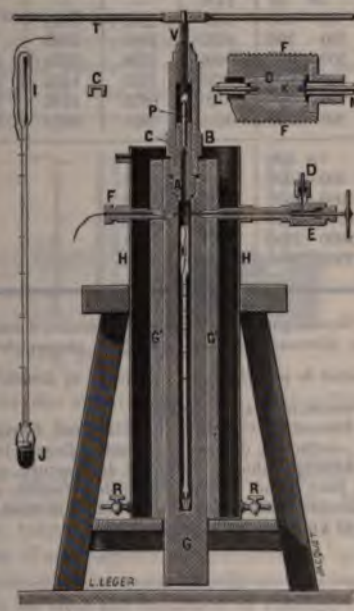


Fig. 248.

Résultats. — 1° *Le coefficient de compressibilité des liquides diminue régulièrement au fur et à mesure que la pression croît; cette diminution est d'autant plus accentuée que la température est plus élevée, et d'autant moins que la pression est plus considérable.*

(La variation du coefficient avec la pression avait été jusque-là l'objet des résultats les plus contradictoires.)

2° *Le coefficient de compressibilité des liquides (sauf l'eau) augmente régulièrement quand la température croît; cette augmentation est d'autant plus rapide que la température est plus élevée, et d'autant moins rapide que la pression est plus considérable.*

Voici un tableau, relatif à l'éther, qui montre l'ensemble de ces lois :

LIMITES DES PRESSIONS entre	ÉTHER (K)					VOLUMES DE L'EAU A ZÉRO	
	0°	50°	100°	138°	198°		
atm.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	atm.	
1 et 50	1470	—	—	—	—	1	1,00000
50 - 100	1329	2234	3934	—	—	50	0,99745
100 - 200	1207	1910	3083	—	—	100	0,99495
300 - 400	0986	1392	1939	2558	3925	200	0,99005
500 - 600	0835	1121	1464	1825	2441	300	0,98530
700 - 900	0720	0953	1195	1402	1791	400	0,98071
900 - 1000	0654	0801	0974	1153	1436	500	0,97625
						600	0,97197
1 et 500	1072	—	—	—	—	800	0,96375
500 - 1000	0708	0900	—	—	—	1000	0,95600
1000 - 1500	0537	0658	—	—	—	1500	0,93890
1500 - 2000	0452	0526	—	—	—	2000	0,92370
2000 - 2500	0371	0441	—	—	—	2500	0,91020
2500 - 3000	0317	0366	—	—	—	3000	0,89850

On voit par le tableau supplémentaire donnant le volume de l'eau à zéro sous les diverses pressions qu'à 3000 atmosphères le volume de ce liquide est réduit de plus de $\frac{1}{10}$ de sa valeur; sa densité par rapport à l'eau à 0° sous la pression normale est 1,113.

Remarque. — Tous ces résultats sont corrigés de la variation du verre, dont le coefficient de compressibilité, d'après les recherches de M. Amagat, est 0,0000022; enfin, le coefficient du mercure, qui présente un intérêt particulier, et pour lequel on avait donné des résultats extrêmement différents, a été spécialement étudié (et à l'aide d'autres méthodes) par M. Amagat, qui l'a trouvé égal à 0,0000039.

CHAPITRE III

NOTIONS DE CAPILLARITÉ.

249. **Phénomènes capillaires : Définitions.** — Il se produit au contact, soit des solides avec les liquides, soit des liquides entre eux, une série de phénomènes qui paraissent en contradiction avec les principes d'hydrostatique. Tels sont, par exemple, les *phénomènes suivants.*

Lorsqu'on plonge un corps solide dans un liquide qui est de

nature à le mouiller, — par exemple une tige de verre bien *propre* dans de l'eau, — le liquide, *comme s'il n'était plus soumis aux lois de l'hydrostatique*, est soulevé autour du corps solide, et sa surface, cessant d'être horizontale, prend une forme concave (fig. 249).

Si au contraire le corps solide plongé n'est pas mouillé par le liquide, — ce qui a lieu pour le verre en contact avec le mercure, — le liquide, au lieu de s'élever, se déprime, et sa surface prend une forme convexe tout a[illegible]r du corps plongé (fig. 250).

En outre, la surface du [illegible]ide affecte la même courbure, concave ou convexe, sur les [illegible]u vase qui le contient, suivant qu'il en mouille ou n'en m[illegible] pas les parois.

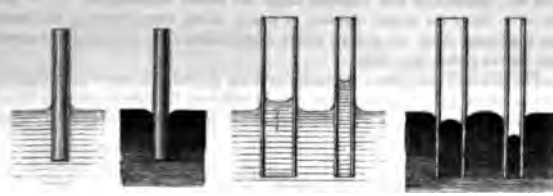


Fig. 249. Fig. 250. Fig. 251. Fig. 252.

Ces phénomènes deviennent plus apparents lorsque, au lieu d'une tige pleine, on plonge dans le liquide des tubes de verre creux d'un petit diamètre. Selon que ces tubes sont ou ne sont pas mouillés, il s'y produit une ascension ou une dépression du liquide, d'autant plus grande que le diamètre est plus petit (fig. 251 et 252). De plus, lorsque les tubes sont mouillés, la surface libre du liquide y prend la forme d'une surface courbe concave, analogue à un segment sphérique : c'est ce qu'on appelle un *ménisque concave* (fig. 251) ; quand ils ne sont pas mouillés, la colonne déprimée se termine par une surface courbe convexe, qu'on appelle *ménisque convexe* (fig. 252).

Les tubes qui servent à ces expériences sont dits *capillaires*, parce que leur diamètre intérieur est assez fin pour être comparable à celui d'un cheveu (*capillus*). Les phénomènes qu'on y observe sont appelés eux-mêmes *phénomènes capillaires*, et ils servent de type à un grand nombre d'autres phénomènes analogues, qu'on rattache à la même cause et qu'on désigne sous le même nom.

La partie de la physique qui étudie ces phénomènes s'appelle *capillarité*. On appliquait également ce nom autrefois à la force moléculaire qu'on avait imaginée pour les expliquer.

On voit, d'après ce qui précède, qu'il y a, dans les phénomènes fondamentaux de la capillarité, deux cas bien distincts : celui des liquides qui mouillent les parois solides du corps, plein ou creux, avec lequel ils sont en contact, et le cas des liquides qui ne les mouillent pas. Le premier cas est défini par l'ascension de l'eau et le second par la dépression du mercure, dans les tubes en verre. Le premier est le seul dont les phénomènes soient parfaitement nets et les lois rigoureusement établies.

I. — PHÉNOMÈNES PRODUITS AU CONTACT DES SOLIDES PAR LES LIQUIDES QUI LES MOUILLENT

250. Lois de l'ascension des liquides dans les tubes capillaires. — 1re Loi ou Loi de Jurin. — *Pour un même liquide, et à une même température, les hauteurs moyennes soulevées dans les divers tubes capillaires sont en raison inverse des diamètres de ces tubes* (fig. 251).

On appelle *hauteur moyenne* la hauteur d'un cylindre à bases circulaires qui aurait exactement le même volume que la colonne liquide soulevée. En appelant h cette hauteur, et $2r$ le diamètre du tube, la loi de Jurin peut s'exprimer par l'équation

$$[1] \qquad rh = \text{constante}.$$

2e Loi. — *Pour un même liquide, et à une même température, les hauteurs moyennes soulevées sont indépendantes de la forme du tube capillaire, au-dessus et au-dessous du ménisque, ainsi que de la substance des parois du tube et de leur épaisseur.*

La première partie de cette loi signifie que la forme du tube capillaire, au-dessus ou au-dessous de la région où se fait le ménisque, n'intervient pas dans le phénomène. Les colonnes soulevées seraient très inégales en poids, mais

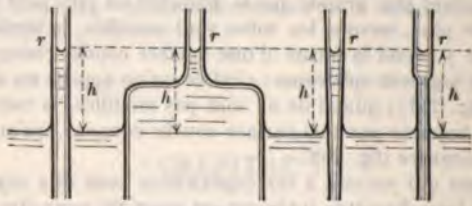


Fig. 253.

égales en hauteur, dans un tube évasé ou dans un tube à large base, ou encore dans un tube exactement cylindrique, qui auraient tous le même diamètre à l'endroit où s'arrête le liquide (fig. 253). Le coefficient r qui entre dans la formule [1] est donc le diamètre qui correspond à la région du ménisque.

3e Loi. — *Pour divers liquides et à une même température, les hauteurs moyennes soulevées dans un même tube capillaire varient avec la nature du liquide.*

Par exemple, dans un tube en verre de diamètre égal à 1,235 mm, l'alcool de

densité égale à 0,819 s'élève à 9,182 mm; l'alcool de densité 0,941 s'élève jusqu'à 9,997 mm; l'essence de térébenthine, jusqu'à 9,952 mm, etc. (Expériences de Gay-Lussac.)

4e Loi. — *Pour tous les liquides, les hauteurs moyennes soulevées dans un même tube capillaire diminuent (jusqu'à devenir nulles) quand la température s'élève.*

Remarque. — En même temps que les hauteurs *s'abaissent*, les ménisques *s'aplatissent*, de sorte que, à partir d'une certaine température, qui est variable pour les divers liquides, la surface capillaire est devenue plane et horizontale, et son niveau coïncide avec le [illegible] r.

251. Loi de l'ascension des li[illegible] eux lames parallèles. — *Pour un même liquide, et à une même t[illegible] la hauteur moyenne soulevée entre deux lames parallèles* (fig. 25[illegible] *[illegible] de la hauteur moyenne qui serait soulevée dans un tube capillair[illegible] être égal à la distance des lames.*

On peut encore dire que *la [illegible] soulevée est la même que dans un tube capillaire de rayon égal à la d[illegible] s lames parallèles.*

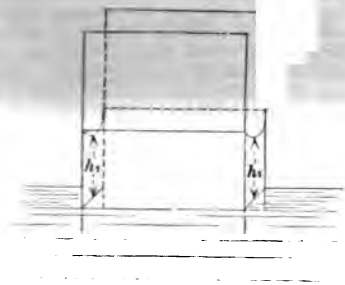


Fig. 254.

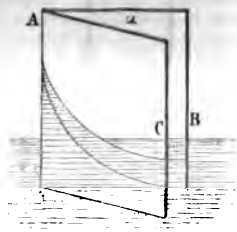


Fig. 255.

Le phénomène de l'élévation de l'eau entre deux lames en verre, parallèles et suffisamment rapprochées, est aussi net que celui de l'élévation dans les tubes capillaires, et il se prête aussi aisément aux mesures de précision.

252. Loi de l'ascension des liquides entre deux lames inclinées. — *Entre deux lames inclinées l'une sur l'autre (d'un très petit angle), plongées verticalement dans un liquide qui les mouille, celui-ci s'élève de manière que sa surface terminale concave ait pour section verticale, dans le plan bissecteur, une hyperbole équilatère.*

Cette loi ne se confirme que dans le cas où l'angle α, des lames AB et BC, est suffisamment petit (fig. 255). On voit alors le liquide s'élever le long de l'arête verticale du dièdre, et deux courbes analogues à des hyperboles équilatères se dessiner sur les faces B et C.

253. Vérification des lois. — Expériences de Gay-Lussac. — La plupart des lois précédentes ont été d'abord trouvées *à priori* par Laplace, à l'aide de l'analyse mathématique. Elles ont ensuite été vérifiées expérimentalement par divers savants, entre autres par Gay-Lussac, le premier, puis, longtemps après lui, par Édouard Desains, Frankenheim, Simon (de Metz), Quet, M. Valson, M. Wilhelmy et M. Quincke (de Heidelberg), M. Van der Mensbrugghe et M. Wolf, etc.

1° *Lavage des tubes capillaires.* — *Gay-Lussac* reconnut qu'une des principales *causes d'erreur dans les expériences antérieures*, c'était le défaut de pro-

preté de la surface intérieure des tubes. Un voile, aussi mince qu'il soit, d'une impureté quelconque suffit pour transformer le verre en une autre substance, et pour empêcher le contact parfait du liquide, — condition nécessaire à la vérification des lois. — Avant d'employer un tube ou une lame de verre, Gay-Lussac avait donc soin de les laver d'abord à l'alcool, puis aux acides.

2° *Remplissage des tubes capillaires.* — Les tubes étant parfaitement propres et complètement secs, Gay-Lussac ne les plongeait point sans précautions. Il faisait monter le liquide, en l'aspirant, jusqu'à l'extrémité supérieure du tube. Une gaine liquide restait alors adhérente à la surface parfaitement nette du verre ou de toute autre substance. C'est dans cette gaine liquide que le liquide montait ou descendait, et se fixait à un niveau déterminé, comme dans un tube du même liquide, auquel le tube solide n'aurait servi que de support.

Remarque. — Les hauteurs moyennes observées par Gay-Lussac, dans ces conditions particulières de propreté des tubes, étaient beaucoup plus grandes, toutes choses égales d'ailleurs, que dans des tubes *non préparés*[1].

3° *Mesure des hauteurs moyennes.* — La hauteur moyenne, d'après sa définition même, n'est pas directement observable. Elle se compose d'abord de la distance h_1 du niveau général extérieur au point le plus bas du ménisque dans le tube, *plus* d'une correction ε qui est égale à la hauteur d'un cylindre ayant même section que le tube et *même volume* que le ménisque liquide (fig. 256). On mesurait donc directement h_1 au *cathétomètre*, l'on calculait ε, et l'on avait $h = h_1 + \varepsilon$.

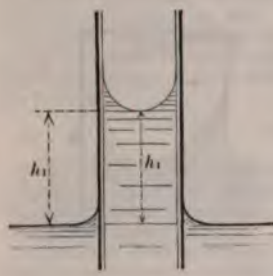


Fig. 256.

4° *Résultats numériques.* — Gay-Lussac ne fit qu'un petit nombre de mesures.

Les résultats relatifs à l'eau (prise à la température de 8° C.), et à l'alcool de densité = 0,819, vérifient la loi de Jurin : le produit rh est *sensiblement constant* pour chacun de ces liquides.

De même, dans un même tube ($r = 0,064$ cm), les hauteurs soulevées sont différentes pour différents liquides (3° loi). Cette même loi a été vérifiée depuis par des mesures de Frankenheim et de Simon (de Metz), ayant porté sur un grand nombre d'autres liquides.

254. **Expériences d'Édouard Desains.** — Les expériences de Gay-Lussac furent reprises par Édouard Desains, dans des conditions plus variées et encore plus précises.

Comme Gay-Lussac, Desains lavait soigneusement ses tubes capillaires, aux acides d'abord, puis à la potasse, enfin à l'alcool et à l'eau. Il y produisait également par aspiration l'ascension des liquides. Enfin il en mesurait les diamètres par le procédé de Gay-Lussac, soit par un jaugeage au mercure pour les tubes les plus fins, soit par un jaugeage à l'eau pour les tubes plus larges[2]. Mais il mesurait les hauteurs soulevées à l'aide d'un procédé plus précis que celui de Gay-Lussac.

Les résultats de ces mesures confirmèrent l'exactitude de la loi de Jurin.

Desains vérifia également la loi de l'ascension entre les lames.

255. **Influence de la température. — Expériences de M. Wolf.** — L'effet de la

1. Elles étaient à peu près doubles de celles qu'avaient observées Newton, *puis Haüy, dans des conditions analogues.*

2. *Il s'est servi de tubes* qui avaient jusqu'à 4,6 mm de rayon.

température est beaucoup plus grand que ne le supposait Laplace. D'après les expériences d'Édouard Desains, de Brünner, de M. Wolf, la diminution de la hauteur moyenne est beaucoup plus rapide que la diminution de densité, qui résulte pour un liquide de la même élévation de température. Ainsi pour l'eau, tandis que la diminution moyenne de densité est d'environ 0,00045 par degré entre 0° et 100°, la diminution moyenne de hauteur moyenne est environ quatre fois plus grande (0,00182).

M. Wolf a poussé beaucoup plus haut l'étude de cette influence. En opérant en vase clos, il a pu atteindre et dépasser la température à laquelle le liquide bout normalement, sous la pression atmosphérique. Il a opéré sur plusieurs liquides, l'*eau*, l'*éther*, l'*alcool*, le *sulfure de carbone*, l'*huile de naphte*. On voit ces liquides baisser rapidement dans les tubes capillaires à mesure que la température s'élève, et en même temps la concavité de leur ménisque s'aplatir; on finit par atteindre une température pour laquelle la capillarité cesse de se manifester, au double point de vue de l'ascension dans les tubes et de la courbure des surfaces terminales. Cette température est variable avec les divers liquides. Elle n'est pour l'éther que de 191°,1, tandis qu'elle dépasse 500° pour l'eau.

256. Tension superficielle. — Constante capillaire. — A l'étude expérimentale de la capillarité on doit rattacher le phénomène de la *tension superficielle*, qu'on peut présenter comme *un fait* et établir *expérimentalement*, en dehors de toute idée théorique préconç[illegible]

1° *Définitions.* — La surface l[illegible] d'un liquide est le siège d'une traction ou *tension* tangentielle, égale dans [illegible]utes les directions, et comparable en tous points à celle que présenterait une mince membrane de caoutchouc enveloppant le liquide[1]. Il en résulte que, si l'on imagine la couche superficielle du liquide coupée normalement par un plan quelconque, il existe une *force de réunion* du liquide pour lui-même, s'exerçant dans le plan tangent et uniformément en tous les points, qui *maintiendrait réunis* les deux bords de la section.

C'est cette force de réunion qu'on appelle proprement la *tension superficielle* du liquide. On donne aussi ce nom à la mesure même de cette force, qu'on a l'habitude d'exprimer *en milligrammes* et de rapporter au *millimètre* de longueur. On désigne également ce coefficient sous le nom de *constante de cohésion* ou de *constante capillaire*.

2° *Démonstration expérimentale directe.* — On peut établir expérimentalement l'existence de cette tension superficielle. Nous citerons quelques-unes des expériences directes les plus probantes.

Expérience de Dupré. — On prend un vase quadrangulaire plat ABCD (fig. 257), dont la paroi métallique CD est mobile autour d'une charnière coïncidant avec l'arête C. Au moyen d'un fil attaché en E, on applique et l'on maintient la paroi CD contre une cale, suivant la direction CD_1. On verse alors de l'eau jusqu'aux bords du vase, et, quand l'équilibre est établi, on brûle brusquement le fil d'attache D_1E : on voit immédiatement la paroi CD_1 revenir spontanément à sa position normale CD. Or la pression hydrostatique tendrait, au contraire, à la maintenir poussée contre la

Fig. 257.

1. Cette assimilation est très ancienne. Ce fut le physicien Segner qui en eut la première idée (1752); et elle servit ensuite à Young, pour établir sans calculs la théorie des phénomènes capillaires.

cale : il faut donc qu'il y ait une force de *traction tangentielle* qui la ramène dans la verticale : c'est un effet de la *tension superficielle*.

Expérience de M. van der Mensbrugghe. — On prend un cadre en fil de fer de forme quelconque (fig. 258) et on le plonge dans le *liquide glycérique* de Plateau[1] ; quand on l'en retire, on obtient une lame liquide plane, limitée aux contours du cadre. Sur cette lame, on pose avec soin une boucle, formée d'un fil de soie très fin, imbibé du même liquide (fig. 258, I) ; puis, avec un tortillon de papier on traverse la boucle de manière à supprimer le liquide intérieur : on voit immédiatement le contour de la boucle se tendre, jusqu'à prendre la forme d'une circonférence de cercle (fig. 258, II). Cet effet ne peut s'expliquer que par la traction tangentielle que le liquide ambiant exerce uniformément sur toute la périphérie de la boucle.

Expérience de M. Pasteur. — Une ancienne expérience de M. Pasteur consiste à enfoncer verticalement une baguette de verre dans un bain de mercure

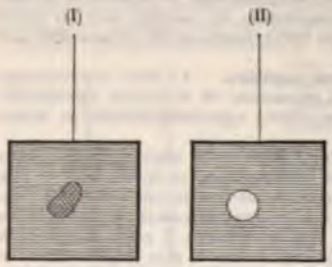


Fig. 258.

Fig. 259.

(fig. 259) dont la surface a été préalablement saupoudrée de grès finement pulvérisé. On voit la poussière disparaître aussitôt dans le trou formé, comme si elle était posée sur une membrane que la baguette entraînerait en s'enfonçant. Dès qu'on retire la baguette, le grès reparaît (en même temps, en quelque sorte, que cette membrane hypothétique) et reprend sa position primitive.

On réussit également bien cette expérience dans un bain d'eau saupoudré de poudre de lycopode. On graisse alors la baguette de verre de façon qu'elle ne soit pas mouillée.

257. Origine de la tension superficielle. — Cohésion des liquides. — État de la couche superficielle. — La tension superficielle est manifestement un effet de la *cohésion des liquides*.

On a donné le nom de forces de *cohésion* aux forces attractives qui s'exercent entre les molécules des corps. Ces forces sont parfaitement nettes dans le cas de l'état solide : ce sont elles qui s'opposent à la rupture des corps solides. De nombreuses expériences prouvent que la cohésion existe également, à un degré plus ou moins élevé, soit entre les molécules des liquides, soit entre celles-ci et les molécules des corps solides et même des gaz qui sont en contact avec les liquides.

1. Ce liquide glycérique a été préparé par Plateau pour remplacer avantageusement l'eau de savon dans la production des bulles de savon et dans les autres expériences de ce genre. Il se compose d'un mélange de trois volumes d'eau de savon (savon de Marseille, 25 grammes par litre) bien filtrée avec deux volumes de glycérine pure.

Une baguette de verre, trempée dans un liquide qui la mouille, entraîne à son extrémité inférieure, quand on la retire du liquide, une gouttelette plus ou moins grosse. La portion du liquide qui est immédiatement en contact avec le verre est évidemment retenue par la cohésion du liquide pour le verre; le reste de la gouttelette est retenu par la cohésion du liquide pour lui-même.

De même une gouttelette de mercure qui, étant posée sur un plan de verre qu'elle ne mouille pas, y prend une forme sphérique, démontre la cohésion du liquide pour lui-même.

Enfin, l'entraînement de l'air dans les trompes aspirantes, par un filet d'eau ou de mercure, m a cohésion de ces liquides pour les gaz.

Tous les faits de ce genre pro d'ailleurs que ces forces attractives ne s'exercent qu'*au contact*, ou plu distances tellement petites, qu'elles ne tombent pas sous les sens : dès listance devient sensible, tout effet de cohésion est annulé. Laplace a *hère d'activité moléculaire* une sphère comprenant toutes les molécu mmelles une molécule centrale peut exercer une action sensible. Le r e sphère d'activité représente évidemment la distance maximum a cohésion peut se faire sentir : il est variable avec la nature des s avec leur état physique.

Or, soit un liquide quelconqu libre : considérons une molécule m située à une distance de la surf MN supérieure au rayon d'activité ρ, caractéristique de ce liquide (fig. 260, I). Cette molécule n'est soumise qu'aux attractions des molécules comprises dans la sphère d'activité dont elle est le centre : par suite toutes ces actions, égales et symétriques, se détruisent. Il ne reste plus que les pressions hydrostatiques dépendant de la profondeur du niveau. Il en sera de même pour toutes les molécules situées dans la position (I); il n'y a point pour elles d'actions résultant de la cohésion. Mais pour toute molécule m' située dans la position (II), c'est-à-dire à une distance de la surface libre inférieure au rayon d'activité, cette symétrie n'existe plus, puisque la sphère d'activité est coupée par la surface libre, et qu'une portion plus ou moins considérable des molécules liquides est remplacée par des molécules gazeuses de moindre cohésion. Donc cette molécule, et toutes celles qui sont dans le même cas, sont nécessairement soumises à certaines actions, bien distinctes des pressions hydrostatiques, et dépendant uniquement des forces de cohésion. Il existe donc pour une *couche superficielle* (dont l'épaisseur est définie par le rayon d'activité moléculaire) un état dynamique spécial, d'où résulte évidemment la *tension superficielle* que l'expérience nous a révélée.

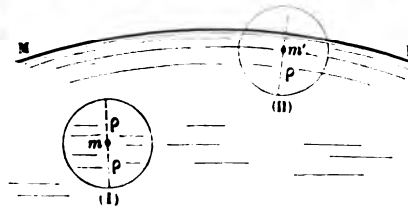


Fig. 260.

Ce sont ces composantes tangentielles de la cohésion qui produisent les effets mécaniques que nous avons mis en évidence précédemment sous le nom de *tension superficielle*.

258. **Conséquences de la tension superficielle. — Pression capillaire. — Formule de Laplace.** — L'existence de cette force de traction, que nous appelons tension superficielle et qui s'exerce *tangentiellement* à la surface du liquide, peut donc être *considérée comme démontrée, non seulement* par l'expérience,

mais aussi par le raisonnement. Nous allons en déduire certaines conséquences, qui nous permettront d'abord de mesurer expérimentalement la valeur de la tension superficielle et puis d'établir très simplement la théorie des phénomènes capillaires.

On démontre géométriquement que :

1° Lorsque la surface libre d'un liquide est *plane*, il ne résulte, du fait de la tension superficielle, aucune force ou pression verticale;

2° Lorsque la surface libre d'un liquide est *courbe* (convexe ou concave), il résulte de la tension superficielle, qui s'y exerce en chaque point, une force (ou pression verticale), qui *s'ajoute* ou *se retranche* à la pression hydrostatique, dans la couche superficielle, suivant que la surface est *convexe* ou *concave*.

Cette pression s'appelle la *pression capillaire* au point considéré. Elle est exprimée par la *formule de Laplace* :

$$[1] \qquad N = \pm S\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right),$$

où S est la *constante de cohésion*, définie précédemment, et R et R' les rayons de courbure principaux de la surface liquide au point considéré.

La pression capillaire est positive ou négative, — c'est-à-dire additive ou soustractive par rapport à la pesanteur, — suivant que la surface libre est convexe ou concave, c'est-à-dire suivant que le liquide ne mouille pas ou mouille les parois du vase qui le contient.

259. **Vérification de la formule de Laplace. — Expériences de Plateau.** — La formule de Laplace a été vérifiée expérimentalement à l'aide d'expériences très curieuses dues au physicien belge Plateau.

Fig. 261.

Imaginons, en effet, qu'on puisse réaliser un liquide *sans poids*, et qu'on en place une petite masse à l'abri de l'attraction moléculaire de toute paroi solide. La condition d'équilibre de cette masse liquide, c'est qu'elle prenne une surface telle, que la pression capillaire y soit partout normale et uniforme. Cette condition sera exprimée par la formule de Laplace, où l'on supposera N = constante. En divisant les deux membres par le coefficient S (qui est une constante pour un liquide déterminé), on aura l'équation

$$[2] \qquad \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} = \text{constante}.$$

Telle est l'équation générale des surfaces extérieures que peut prendre une masse liquide dénuée de poids, et soustraite à toute autre action moléculaire que sa propre cohésion. Or on sait, en géométrie, que toutes les surfaces à

courbure moyenne constante satisfont à cette équation. Telles sont, par exemple, la *sphère*, le *plan*, la *surface latérale d'un cylindre circulaire droit*.

M. Plateau a pu réaliser ces différentes figures d'équilibre à l'aide de petites masses d'huile, mises en suspension dans une plus grande masse d'eau alcoolisée, *de même densité*. En vertu du principe d'Archimède, la masse d'huile était ainsi absolument soustraite à l'action de la pesanteur. Les expériences se faisaient dans un appareil, devenu classique, qui consiste en un vase cubique, dont les parois sont des glaces à faces parallèles (fig. 261). On le remplit d'abord presque entièrement avec de l'eau alcoolisée; puis on y introduit, à l'aide d'une petite seringue à bec effilé et recourbé, une petite quantité d'huile.

Première expérience. — On voit d'abord l'huile s'arrondir en une sphère parfaite (fig. 262, I). En augmentant peu à peu sa masse, on peut l'amener jusqu'à un diamètre de 10 centimètres. Cette forme sphérique est parfaitement stable : elle se reproduit spontanément dès qu'on l'a altérée.

Deuxième expérience. — Une fois qu'on a obtenu cette sphère liquide, on peut, en la soumettant à l'action de la force centrifuge, réaliser une autre expérience curieuse. Il suffit pour cela de la traverser, suivant son diamètre vertical, par une tige très fine, à laquelle on peut imprimer un mouvement de rotation sur elle-même, plus ou moins rapide.

Fig. 262.

Pour une vitesse ordinaire, la sphère s'aplatit aux pôles et prend la forme du sphéroïde terrestre (fig. 262, II). Pour une vitesse plus grande, une partie de la masse d'huile se détache, dans le plan de l'équateur, et forme autour du noyau central, qui reste sphérique, un anneau concentrique, qui rappelle l'anneau de Saturne (fig. 262, III).

Troisième expérience. — Pour réaliser d'autres surfaces satisfaisant à l'équation [2], il est nécessaire d'assujettir la masse d'huile à passer par certaines pièces solides fixes, qui servent en quelque sorte de carcasses ou de supports à la surface liquide [1].

Remarques. — 1° Ces expériences vérifient indirectement l'existence de la tension superficielle des liquides, en démontrant directement la formule [2] et, par suite, la formule [1] qu'on en a déduite.

Théorie des phénomènes capillaires. — Toute la théorie de la capillarité peut se déduire de la notion de tension superficielle, et toutes ses lois sont contenues dans la formule de Laplace.

1. Plateau a réalisé de cette manière plusieurs autres surfaces de révolution, qui satisfont à l'équation [2]. Elles se rattachent toutes à trois types, qu'il nomme, d'après la forme de leur *courbe méridienne*, *l'onduloïde*, la *caténoïde* (dont la *méridienne est une chaînette*) et la *nodoïde*.

II. — PHÉNOMÈNES PRODUITS AU CONTACT DES CORPS SOLIDES PAR LES LIQUIDES QUI NE LES MOUILLENT PAS.

260. Contact des liquides et des solides. — Angle de raccordement. — Les phénomènes capillaires se compliquent et deviennent moins nets dans le cas où le liquide ne mouille pas la substance du tube capillaire. Si, par exemple, sur une surface plane et horizontale bien propre, on verse quelques gouttes d'un liquide qui ne la mouille pas, ce liquide (fig. 263) forme généralement une sorte de masse plus ou moins arrondie, se raccordant avec la surface solide par un angle déterminé $CAS_1 = \omega$, que l'on appelle *angle de raccordement*. Cet élément, dont nous n'avions pas eu à nous occuper jusqu'ici, joue un rôle capital dans les phénomènes capillaires qu'il nous reste à étudier.

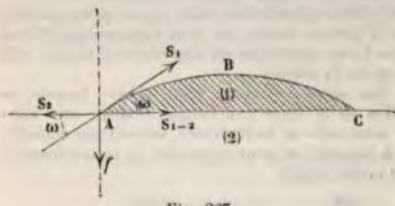


Fig. 263.

261. Étude expérimentale de l'angle de raccordement. — *Expériences de M. Quincke.* — Théoriquement, *l'angle de raccordement est constant pour le même corps solide et le même corps liquide.* Cela résulte de la formule qu'on obtient en calculant l'angle ω en fonction de la tension superficielle et des forces de cohésion.

Une ancienne expérience de Gay-Lussac semblait vérifier cette constance dans le cas du mercure et du verre. Des expériences plus précises n'ont pas confirmé ce résultat de Gay-Lussac.

M. Quincke a mesuré par un procédé optique l'angle de raccordement des diverses gouttes de mercure posées sur un même plan de verre. Il mesurait en outre trois éléments géométriques, qui en définissaient la forme : l'ordonnée maximum a, l'ordonnée du point extrême de contact b, enfin l'ordonnée du bord de la goutte c (fig. 264). Il a constaté les faits suivants :

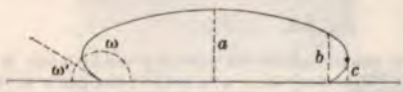


Fig. 264.

1° Il se produit un changement continu dans la forme des gouttes, très rapide d'abord pendant les premières minutes qui suivent le dépôt sur le verre, puis se ralentissant de plus en plus, sans cesser d'ailleurs au bout de plusieurs heures et même de plusieurs jours.

2° Il y a de même une variation continue dans la grandeur de l'angle aigu ω' de raccordement.

Conclusions. — Il résulte de ces deux faits que l'équilibre capillaire n'est jamais *complet* ni *stable* pour une goutte de mercure posée sur un plan de verre. De nombreuses observations[1] ont démontré qu'il en est de même pour des colonnes de mercure, ascendantes ou descendantes, dans des tubes en verre, bien qu'ici le frottement puisse y établir un équilibre apparent, lequel n'est que momentané.

L'angle de raccordement *n'est donc pas constant* entre un même liquide et *un même solide. Pour* le verre et le mercure, en particulier, on a trouvé qu'il

1. *Observations de* Bravais et Expériences de M. Quincke.

peut varier, *sans raison apparente*, entre 38° et 45°. La variation est *à fortiori* plus grande et plus brusque lorsqu'il y a une cause apparente, telle que l'ébranlement de la lame ou du tube solide, ou bien l'interposition de la moindre couche de substance étrangère sur le liquide et le solide en contact.

262. **Lois de la dépression des liquides dans les tubes capillaires, et entre les lames parallèles.** — La théorie de la capillarité conduit, dans le cas où les liquides ne mouillent pas les solides et subissent une dépression, aux mêmes lois que dans le cas de l'ascension. Nous n'énoncerons que les deux principales.

Loi de Jurin. — *Pour un même liquide, et à une même température, les dépressions moyennes dans divers tubes capillaires sont en raison inverse des diamètres de ces tubes.*

Cette loi s'exprime, comme la loi analogue des liquides qui mouillent, par la formule

$$rh = \text{constante}.$$

Cette constante est déterminée par la théorie.

En appelant S_1 la *tension superficielle* propre du liquide, D la densité et ω l'angle aigu de raccordement (fig. 264), on a

$$rh = \frac{2S_1 \cos \omega'}{D}.$$

On voit, d'après la formule même, que la dépression moyenne h est fonction de l'angle de raccordement.

Loi des lames parallèles. — *Pour un même liquide, et à une même température, la dépression moyenne, entre deux lames parallèles, est moitié de la dépression qui se produirait dans un tube capillaire de diamètre égal à la distance des lames.*

La vérification de ces lois a été faite, ou du moins tentée, pour le mercure et le verre. Elle présente de nombreuses difficultés, les unes expérimentales qu'on a pu surmonter, et les autres théoriques qui sont insurmontables.

263. **Conséquences relatives à la correction barométrique. — Construction des Tables de correction.** — Si la loi de Jurin était rigoureusement exacte, l'erreur due à la capillarité, dans les tubes barométriques, serait facile à corriger, puisqu'elle serait exactement en raison inverse des diamètres. Il suffirait de faire une seule observation, sur un verre donné, pour calculer la table de correction correspondante à toute espèce de tubes du même verre. Mais, à cause de la variabilité de l'*angle de raccordement*, il est indispensable de faire intervenir la valeur de cet angle dans les tables de correction. Aussi toutes ces tables de correction, depuis les plus anciennes, dues à Bouvard, jusqu'aux plus récentes, dues à Mlle Gutkowska, donnent-elles, pour un même diamètre de tube, les dépressions correspondant à différentes valeurs possibles de l'angle capillaire ω'.

Fig. 265.

Usage de la flèche du ménisque. — Au lieu de mesurer l'angle capillaire ω', il est plus commode de mesurer la *flèche f* du ménisque. On appelle ainsi la distance du point le plus élevé du ménisque au-dessus du plan de la ligne de raccordement. Dans le cas où le ménisque est exactement circulaire, ces deux éléments sont reliés l'un à l'autre par une formule très simple. En effet, soit une section du ménisque et du tube par un plan passant par l'axe (fig. 265) ; soit r le *rayon du tube, qui est en même temps le rayon du petit cercle de la sphère dont le ménisque fait partie* et soit R le rayon de *cette sphère.*

On a évidemment

$$f = OP - OP'$$

avec

$$OP = R, \qquad OP' = r \sin \omega' \qquad \text{et} \qquad R = r' \cos \omega'.$$

En substituant ces valeurs, il vient

$$f = r \cdot \frac{1 - \sin \omega'}{\cos \omega'}.$$

Construction des tables. — Si l'on admet que le ménisque soit circulai dépression moyenne h est liée à la flèche et à la tension superficielle S l'équation

$$h = \frac{D(r + f^2)}{4 S_1 f}.$$

On peut donc, en admettant une valeur constante de S_1, construire une indiquant pour chaque valeur du rayon r les dépressions correspondante diverses valeurs possibles de la flèche f.

Cette table conviendra en général pour un baromètre quelconque, parce s'il est vrai que l'angle ω' varie beaucoup d'un mercure à l'autre (de 38° à en revanche la tension S_1 varie très peu (à peine de $\frac{1}{20}$ de sa valeur).

III. — PHÉNOMÈNES CAPILLAIRES DIVERS. — APPLICATIONS.

264. Longueur de la colonne liquide suspendue dans un tube ouvert. — qu'on plonge un tube capillaire dans un liquide qui le mouille (fig. 266, I),

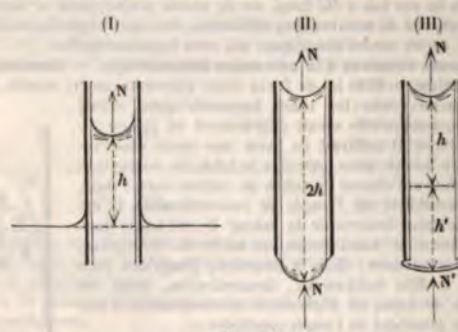


Fig. 266.

ci s'élève jusqu'à une hauteur h déterminée par la loi de Jurin, et il se te par un ménisque concave. Cette hauteur h est telle, qu'elle fait équilibr composante normale N de la tension superficielle, déterminée par la cou du ménisque.

Si l'on retire avec précaution le tube du liquide, non seulement on em *avec lui la colonne liquide* soulevée, mais celle-ci est *plus grande* que d *cas précédent : elle peut être double*, c'est-à-dire égale à 2h, si l'orifice inf *du tube est taillé en biseau.*

En même temps, la colonne liquide se termine inférieurement par un ménisque *convexe*, de même courbure que le ménisque supérieur (fig. 266, II). Ce dernier fait explique le précédent. En effet, le ménisque inférieur, étant identique au ménisque supérieur, développe comme lui une composante normale, dirigée de haut en bas, et également capable de faire équilibre à une colonne h. La colonne suspendue doit donc avoir une hauteur totale $2h$.

Enfin, si l'orifice inférieur est terminé par des bords plans (fig. 266, III), le ménisque inférieur qui s'y forme correspond au *diamètre extérieur* du tube et non plus au *diamètre intérieur*, comme dans le cas du biseau. Ce ménisque extérieur est moins courbe que le précédent, et développe une composante normale $N' < N$: par suite, la colonne h' qu'il peut soutenir est plus petite que h. La hauteur totale suspendue est donc plus faible que dans le cas précédent : elle n'est plus que $h + h'$ ($< 2h$).

265. Formation des gouttes à un orifice capillaire. — Loi de Tate. — Théorie du compte-gouttes. — Nous avons dit que l'effet du ménisque inférieur, joint à celui du ménisque supérieur, suffit pour soutenir la colonne $h + h'$. Si le ménisque inférieur était seul, il pourrait équilibrer une pression h'. C'est ce qui explique pourquoi, lorsqu'un liquide est contenu dans un vase terminé par un orifice étroit à sa partie inférieure, tel qu'un compte-gouttes (fig. 267, I), il faut un certain excès de pression pour faire écouler le liquide par cet orifice. Si cette pression est limitée, comme dans l'expérience précédente, le ménisque inférieur garde une forme invariable et la goutte s'arrête dans son développement. Si, au contraire, la pression intérieure est croissante, elle finit par triompher de la résistance du ménisque, la goutte se gonfle progressivement, comme dans un petit sac élastique dont la tension diminue à mesure qu'il grossit ; puis, lorsque la goutte est devenue assez volumineuse pour que son poids dépasse la composante normale de la tension superficielle, elle s'étrangle à la partie supérieure (fig. 267, II) et finit par se détacher, en se rompant suivant une circonférence $o'o'$ qui est à peu près égale à celle de l'orifice oo.

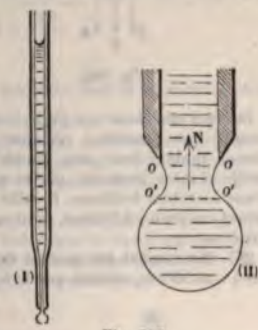


Fig. 267.

Loi de Tate. — Les gouttes qui se forment ainsi à l'orifice de divers tubes capillaires ont, pour un même liquide, des poids proportionnels aux diamètres de ces tubes.

On a également démontré par l'expérience que :

1° Les poids des gouttes sont indépendants de la substance solide qui forme l'orifice (quand elle est parfaitement mouillée par le liquide).

2° Ces poids diminuent quand la température s'élève.

Ces lois prouvent que ce phénomène est une conséquence directe de la tension superficielle qui s'exerce tout le long du cercle de gorge $o'o'$, dont le diamètre peut être considéré comme proportionnel à celui de l'orifice.

Elles constituent la théorie du *compte-gouttes*, petit instrument en verre (fig. 267, I) qu'on emploie, en thérapeutique, pour obtenir une masse déterminée d'une liqueur pharmaceutique d'après le nombre de gouttes versées. On voit combien il importe d'employer, en pharmacie, des instruments ayant exactement le même *diamètre à l'orifice*.

266. Exception aux lois de l'équilibre des corps flottants. — Plusieurs exceptions curieuses au principe de l'équilibre des corps flottants s'expliquent par

des effets de la tension superficielle et rentrent dans la catégorie des phénomènes capillaires. Tels sont les faits suivants.

Aiguilles métalliques flottant sur l'eau. — Une aiguille d'acier, préalablement recouverte d'une très mince couche graisseuse et posée avec précaution à la surface de l'eau *ne s'y enfonce pas*, bien que sa densité soit environ 7 fois 1/2 plus forte que celle du liquide (fig. 268, I). En même temps l'eau se déprime fortement autour d'elle. Mais si le liquide vient à mouiller l'aiguille (fig. 267, II), elle est immédiatement entraînée au fond du vase.

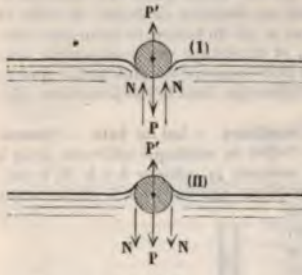


Fig. 268.

Ces phénomènes s'expliquent aisément par l'effet des composantes normales de la tension superficielle, qui s'exercent en N, N, de bas en haut. Dans le premier cas, ces composantes s'ajoutent à la poussée P' du liquide pour faire équilibre au poids P de l'aiguille, de manière qu'on ait $P = N + P'$.

Dans le deuxième cas, les composantes N s'ajoutent au poids P, de manière que la poussée P' est impuissante à équilibrer ces deux forces. On a $P + N > P'$.

Insectes marchant sur l'eau. — L'expérience précédente explique la curieuse faculté que possèdent certains insectes[1] de marcher sur l'eau sans s'y enfoncer, malgré leur plus grande densité. Ils sont dans le même cas que l'aiguille d'acier graissée, parce que leurs pattes sont naturellement enduites d'une sécrétion huileuse. Il suffit en effet de dissoudre cette couche grasse, en lavant ces pattes à l'éther, pour enlever à ces animaux leur faculté de marcher sur l'eau.

267. **Mouvement des gouttes dans les tubes capillaires coniques.** — Il y a deux cas à considérer, suivant que le liquide mouille ou ne mouille pas la substance du tube.

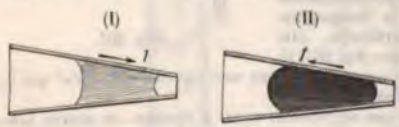


Fig. 269.

1° On introduit une goutte d'eau dans un tube capillaire en verre, de forme conique et disposé horizontalement (fig. 269, I). La goutte s'étale en formant à ses deux extrémités deux ménisques concaves, inégalement courbes; la plus grande courbure est tournée vers le bout étroit du tube et la plus petite courbure vers le bout large; de plus, au lieu de *se fixer* dans la position où on l'a mise, *elle se meut spontanément vers le bout étroit* du tube.

2° On introduit une goutte de mercure bien propre dans le même tube ou dans un tube analogue (fig. 269, II). On voit se produire le phénomène *inverse*. La goutte se termine par deux ménisque convexes, et *s'avance vers le bout large* du tube.

Ces deux faits sont des effets très simples de la tension superficielle. Dans le premier cas, chaque point du ménisque A, le centre en particulier, est sollicité *par la pression* atmosphérique H, diminuée de la composante normale N de la

1. *On peut citer les insectes à longues pattes appelés tisserands.*

tension. En supposant que le ménisque soit hémisphérique, et en appelant R le rayon du tube en ce point, on a

$$N = S\frac{2}{R} = \frac{2S}{R}.$$

La force qui presse le ménisque en A est donc (par unité de surface) $H - \frac{2S}{R}$.

De même, la force qui pousse le ménisque en B est $H - \frac{2S}{r}$.

La résultante de ces deux forc

$$f = \quad - \frac{1}{R}\Big).$$

On voit qu'elle est *positive*, pui est < R : par conséquent, la goutte sera poussée vers la partie étroite du

Dans le deuxième cas, les deu s en A et en B sont

$$H + \frac{2S}{R} \qquad H + \frac{2S}{r}.$$

Leur différence est $2S\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r}\right)$: elle est *négative*. Donc la pression s'exerce de B vers A : la goutte sera poussée vers la partie large.

268. Attractions et répulsions des corps flottants. — La même explication s'applique aux mouvements d'attraction ou de répulsion qu'on observe entre certains corps légers qui flottent à la surface de liquides qui les mouillent ou ne les mouillent pas.

Deux balles de liège flottant sur l'eau s'attirent brusquement dès qu'elles arrivent dans le voisinage l'une de l'autre. On remarque en outre que le liquide les mouille et monte plus haut entre elles qu'à l'extérieur (fig. 270, I) : de là l'explication de l'attraction, comme dans l'expérience précédente.

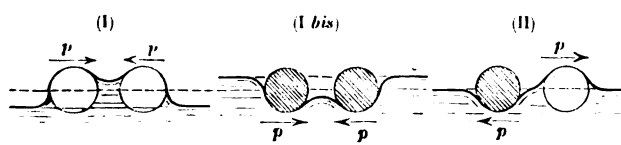


Fig. 270.

Deux balles de liège, passées au noir de fumée ou bien graissées, flottant sur l'eau (fig. 270, I *bis*), s'attirent de même lorsqu'elles sont suffisamment rapprochées. On remarque en outre que le liquide ne mouille pas les balles et qu'il s'abaisse plus entre les deux corps qu'à l'extérieur : de là l'explication de l'attraction.

Enfin, deux balles de liège, l'une noircie et l'autre non noircie, flottant sur l'eau, *se repoussent* brusquement (fig. 270, II) dès qu'elles arrivent dans le voisinage l'une de l'autre ; et l'on remarque que le liquide s'abaisse le long de la première balle *plus à l'extérieur qu'à l'intérieur*, et qu'il s'élève de même le long de la deuxième balle *plus à l'extérieur qu'à l'intérieur*.

Remarque. — On *explique de la même manière les* attractions ou les répul*sions exercées sur les corps flottants, soit par les* bords des vases, soit par

d'autres objets immergés dans le liquide, suivant que celui-ci mouille ou ne mouille pas les deux corps en présence, ou bien qu'il mouille l'un et ne mouille pas l'autre.

269. Expérience de M. Lippmann. — Phénomènes électrocapillaires. — Parmi les mouvements dus aux effets de la tension superficielle, on peut citer une très curieuse expérience de M. Lippmann. On dépose sur une soucoupe une large goutte de mercure et, par-dessus, on verse une couche d'eau, acidulée et additionnée de bichromate de potasse; enfin, sur le bord de la soucoupe on fixe un fil de fer, qui pénètre dans l'eau acidulée et vient toucher la surface extérieure du mercure. Dès qu'il y a contact, la goutte se contracte et abandonne le fer, puis elle reprend sa forme initiale, touche de nouveau le fer, se contracte de nouveau : le même mouvement alternatif se continue indéfiniment.

Ici le phénomène capillaire proprement dit se complique d'un phénomène chimique et d'un phénomène électrique. Il faut faire intervenir ces trois effets pour expliquer le mouvement. Au contact de l'eau acidulée, le mercure s'oxyde, sa tension superficielle diminue et la goutte s'aplatit : c'est alors qu'elle touche le fil de fer. Il se forme alors entre le mercure, l'eau acidulée et le fer un *couple voltaïque*, dont le courant réduit l'oxyde de mercure, et rend à la surface sa netteté primitive ainsi que sa tension superficielle normale, et la goutte s'arrondit de nouveau en se contractant; puis l'oxyde se reforme, la tension superficielle diminue, la goutte s'aplatit de nouveau, et ainsi de suite.

Ce phénomène capillaire, dans lequel intervient l'électricité, est le type d'une catégorie de phénomènes extrêmement curieux, connus sous le nom de *phénomènes électrocapillaires*. M. Lippmann est parvenu à débrouiller l'obscure complexité de ces phénomènes, et à découvrir la loi qui lie l'état électrique (*ou potentiel*) d'une surface à la valeur de sa tension superficielle. Il a appliqué cette loi à la construction de son *électromètre capillaire*, l'un des instruments les plus ingénieux et les plus précis de la physique[1].

270. Application de la capillarité aux aréomètres. — Tous les aréomètres sont munis de tiges capillaires et sont plongés dans des liquides qui les mouillent. Il doit en résulter nécessairement des attractions qui faussent l'équilibre, tel que nous l'avions établi précédemment en ne tenant compte que des pressions ou des poussées hydrostatiques.

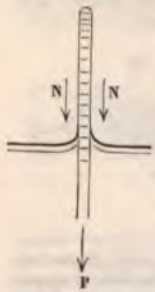


Fig. 271.

1° *Erreurs dues à la capillarité.* — Un aréomètre étant plongé dans un liquide qui le mouille (fig. 271), celui-ci s'élève en ménisque concave tout autour de sa tige, et exerce sur toute la circonférence de raccordement un effet de traction, dû à la tension superficielle. Cette traction s'ajoute donc au poids de l'instrument, pour l'enfoncer un peu plus que ne l'indique l'équation d'équilibre hydrostatique. On a calculé, par exemple[2], que, pour un densimètre pesant 27,220 g, et plongé dans de l'eau ordinaire, l'accroissement de poids, dû à la tension superficielle, est égal à 0,255 g (environ $\frac{1}{100}$ du poids total), et qu'il en résulte un excès d'immersion de 3 mm : par suite, si la tension superficielle du liquide disparaissait, l'instrument remonterait de 3 mm.

Dans un autre liquide, où la tension superficielle serait de 1/3 seule-

1. *Nous en donnons la description plus loin, dans le chapitre consacré à l'Électrométrie.*

2. *M. Duclaux, Journal de physique* (1872).

ment inférieure à celle de l'eau, le même aréomètre se relèverait de 1 mm[1].

2° *Correction de l'erreur capillaire.* — Soit r le rayon de la tige capillaire au niveau de la ligne de flottaison, et soit N la valeur de la composante verticale de la tension superficielle du liquide. La pression qui s'exerce sur toute la circonférence de flottaison a pour valeur $2\pi r N$. L'équation d'équilibre doit donc s'écrire de la manière suivante (P, poids de l'instrument; v, volume immergé; D, densité du liquide) :

$$[1] \qquad vD = P + 2\pi r N.$$

Si l'on plonge le même instrument dans un autre liquide, de densité D' et de tension superficielle différente, le volume immergé deviendra v', et l'équation d'équilibre sera

$$[2] \qquad v'D' = P + 2\pi r N'.$$

En divisant ces deux équations membre à membre, et en isolant le rapport $\frac{D}{D'}$, il vient

$$[3] \qquad \frac{D}{D'} = \frac{v'}{v} \cdot \frac{P + 2\pi r N}{P + 2\pi r N'}.$$

On voit que le rapport des densités des deux liquides n'est plus égal au rapport inverse des volumes immergés. La divergence, représentée par le facteur $\frac{P + 2\pi r N}{P + 2\pi r N'}$, dépend de la différence des tensions superficielles des liquides considérés.

3° *Conclusion.* — Il résulte de cette discussion qu'on ne peut employer avec rigueur le même aréomètre pour des liquides différents, car il suffit d'une variation dans la tension superficielle pour fausser l'équilibre, en produisant un déplacement plus ou moins grand de la ligne d'affleurement. Par exemple, lorsqu'un aréomètre sensible est plongé dans l'eau et s'y tient en équilibre, il suffit de répandre à la surface de l'eau une trace imperceptible d'un corps gras, qui s'y étend comme un voile extrêmement mince, pour faire remonter l'instrument d'une quantité notable, par suite de la diminution de la tension superficielle.

Les seuls aréomètres parfaitement justes seront donc les aréomètres à graduation empirique et ne servant *que pour un seul liquide*, construits sur le modèle de l'alcoomètre de Gay-Lussac.

1. Dans un liquide qui ne mouillerait pas l'aréomètre, l'effet de la tension superficielle serait inverse : l'instrument serait relevé, au lieu d'être enfoncé.

LIVRE VI

ACOUSTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRODUCTION, PROPAGATION ET RÉFLEXION DU SON.

271. **Objet de l'acoustique. — Sons et bruits.** — L'*acoustique*[1] a pour objet l'étude des sons, c'est-à-dire des sensations de l'ouïe, au double point de vue de leur production et de leur propagation.

La musique considère les sons par rapport aux sentiments qu'ils peuvent exciter en nous; l'acoustique ne traite que des propriétés physiques des sons, abstraction faite des sensations esthétiques qu'ils nous font éprouver.

Tous les sons ne sont pas identiques : ils présentent des différences assez sensibles pour qu'on puisse les distinguer entre eux, les comparer et déterminer leurs rapports.

On distingue le son d'avec le *bruit*. Le son proprement dit, ou *son musical*, est celui qui produit une sensation continue et dont on peut apprécier la valeur musicale, tandis que le bruit est, ou bien, comme le bruit du canon, un son trop court pour qu'on puisse le classer dans l'échelle musicale, ou bien un mélange confus de plusieurs sons discordants, comme le roulement du tonnerre ou le bruit des vagues. Toutefois la différence entre le son et le bruit n'est pas nettement tranchée : on a pu apprécier les hauteurs d'une suite de bruits produits successivement et en évaluer les rapports.

272. **Cause du son.** — Le son est le résultat d'oscillations rapides exécutées par les molécules des corps élastiques, lorsque, par

1. *En grec*, ἀκουστικός, *de* ἀκούειν, entendre.

le choc ou le frottement, l'état d'équilibre de ces molécules a été troublé. Elles tendent alors à reprendre leurs positions initiales; mais elles n'y reviennent qu'en exécutant, en deçà et au delà de ces positions, des mouvements vibratoires extrêmement rapides, dont l'amplitude décroît très vite.

On nomme *corps sonore* celui qui rend ou peut rendre un son, et *vibration simple* le mouvement qui ne comprend qu'un *aller* ou un *retour* des molécules vibrantes, *vibration double* ou *complète* le mouvement d'*aller* et de *retour*.

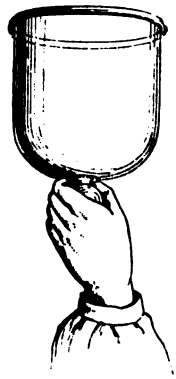


Fig. 272.

L'état vibratoire d'un corps qui résonne est facile à constater par des expériences très simples. Qu'on projette une poussière légère sur le corps sonore, elle prend un mouvement de trépidation rapide et visible à l'œil nu. De même, si l'on pince une corde tendue un peu longue, ses vibrations sont apparentes à l'œil. On n'a qu'à prendre une cloche de verre par le bouton supérieur (fig. 272) et, pendant qu'on la tient d'une main dans une position verticale, donner de l'autre main un coup sec sur les parois, de manière à les faire vibrer. Or, si l'on a placé au dedans un petit fragment de métal, il subit, de la part des parois vibrantes, de petits chocs rapides et réitérés, qui résultent d'un mouvement de trépidation plus ou moins vif, accompagné d'un bruit sec particulier. En posant la main sur la cloche, on éteint les vibrations et les chocs.

273. **Le son ne se propage pas dans le vide.** — Les vibrations des corps élastiques ne peuvent faire naître en nous la sensation du son que par l'intermédiaire d'un milieu pondérable, interposé entre l'oreille et le corps sonore, et vibrant avec lui. Ce milieu est ordinairement l'air; mais les gaz, les vapeurs, les liquides, les solides, transmettent aussi le son.

Supposons, en effet, qu'on place sous la cloche d'une machine pneumatique un timbre métallique qui résonne automatiquement à l'aide d'un mouvement d'horlogerie (fig. 273). Tant que la cloche est pleine d'air à la pression ordinaire, on entend le son du timbre; mais à mesure qu'on raréfie l'air, l'intensité du son diminue · il cesse d'être perceptible lorsque le vide est poussé à un degré suffisant.

Pour que l'expérience réussisse bien, il faut poser la sonnerie *sur de la ouate : autrement*, les pièces métalliques de l'instrument

transmettraient leurs vibrations à la platine de la machine pneumatique, et celle-ci à l'air extérieur.

On fait aussi usage d'un ballon de verre à robinet, contenant une petite sonnette suspendue à un fil. Si l'on agite le ballon lorsqu'il est plein d'air, on entend distinctement la sonnette ; mais après qu'on a suffisamment raréfié l'air qu'il renferme, on n'entend plus rien.

274. **Le son se propage dans tous les corps élastiques.** — Si, dans les expériences ci-dessus, après avoir fait le vide, on laisse entrer dans le récipient un gaz ou une vapeur, on entend de nouveau le timbre ou la sonnette : cela démontre que le son se propage dans les gaz et dans les vapeurs comme dans l'air.

Fig. 273.

Le son se propage encore mieux dans les liquides. Lorsqu'on choque deux pierres sous l'eau, dans une rivière, on entend distinctement, de la rive, le bruit du choc. Inversement, un plongeur perçoit, au fond de l'eau, ce qu'on dit sur le rivage.

Quant aux solides, leur conductibilité est telle, qu'un bruit extrêmement léger, comme celui d'une barbe de plume qu'on frotte à l'extrémité d'une poutre en bois, est perçu à l'autre extrémité. Le sol conduit si bien le son, que, la nuit, en appliquant l'oreille contre terre, on peut entendre, à de grandes distances, des pas de chevaux ou tout autre bruit.

275. **Vitesse du son dans les gaz.** — La propagation du son dans les gaz, les liquides ou les solides n'est pas instantanée ; le son ne peut se transmettre d'un lieu à un autre que dans un intervalle de temps plus ou moins long. C'est ce que démontrent un grand nombre de phénomènes, et, entre autres, le tonnerre : on n'entend le bruit qu'un certain temps après qu'on a vu l'éclair, bien que le bruit et l'éclair se soient produits simultanément dans la nue.

On appelle *vitesse du son*, dans un milieu élastique qui le transmet, *l'espace qu'il y parcourt en une seconde.*

1. *Vitesse du son dans l'air.* — *Expériences du Bureau des Lon-*

gitudes (1822). — De nombreuses tentatives[1] ont été faites pour déterminer la vitesse du son dans l'air atmosphérique. La dernière fut faite dans l'été de 1822, pendant la nuit, par les membres du Bureau des Longitudes. On avait choisi pour stations deux hauteurs situées, l'une à Villejuif, l'autre à Montlhéry, près Paris.

Méthode. — A chaque station, on tirait de dix en dix minutes un coup de canon. Les observateurs de Villejuif entendirent très distinctement les douze coups tirés à Montlhéry; mais ceux de Montlhéry n'entendirent que sept coups sur douze tirés à Villejuif, la direction du vent étant contraire. A chaque station, on notait, au moyen de chronomètres, le temps qui s'écoulait entre l'apparition de la lumière, au moment de l'explosion, et l'audition du son. Ce temps pouvait être considéré comme égal à celui qu'employait le son pour franchir la distance de deux stations, car celle-ci n'était que de 18 612,52 m, et l'on verra que la lumière parcourt cette distance en un temps inappréciable.

Résultats. — Valeur moyenne de la vitesse. — On constata ainsi que la durée moyenne de propagation entre les deux stations était de 54",6; en divisant par ce nombre la distance de deux stations, on trouva que la vitesse du son est de 340,9 m à la température moyenne des expériences, laquelle était de 15°,9 C.

Influence de la température. — La vitesse du son dans l'air décroît lorsque la température baisse : à 10°, elle n'est que de 337 mètres; à zéro, de 333 mètres. Mais, pour une même température, elle est indépendante de la densité de l'air, et, par conséquent, de la pression atmosphérique.

Influence de la hauteur du son. — A température égale, la vitesse dans l'air est la même pour tous les sons, qu'ils soient forts ou faibles, graves ou aigus. Ce fait résulte d'autres expériences, exécutées par Biot, sur la propagation du son dans les tuyaux de conduite. Il constata que, lorsqu'on jouait de la flûte à l'extrémité d'un tuyau en fonte de 951 mètres de longueur, on percevait l'air à l'autre extrémité sans la moindre altération de rythme ni de mélodie : cela prouvait que les différents sons se propagent avec des vitesses égales.

Influence de la nature du gaz. — Enfin la vitesse du son varie d'un gaz à un autre, à température égale. Ainsi Dulong a trouvé pour la vitesse du son dans différents gaz, à la température de zéro, les nombres suivants[2] :

1. On doit rappeler, entre autres, les expériences des académiciens de Paris, *exécutées en 1736*, entre Montmartre et Montlhéry. Elles donnèrent 173 toises *ou 337 m par seconde*, à 6° C environ. Il en résulterait 332 m pour la vitesse à 0° C.
2. *Ces nombres ont été* calculés à l'aide des formules des tuyaux sonores.

Acide carbonique	261	mètres.
Oxygène	317	—
Air	333	—
Oxyde de carbone	337	—
Hydrogène	1269	—

276. Calcul de la vitesse du son dans les gaz. — Formule de Newton. — Correction de Laplace. — Newton le premier a trouvé par le calcul la formule $V = \sqrt{\frac{E}{D}}$, dans laquelle V repr[illegible]se de propagation d'un mouvement vibratoire dans un milie[illegible]e, E le *coefficient d'élasticité* du milieu et D sa *densité absolue*.

Dans le cas du son se propagea[illegible]s la pression p et à la température t, il faut calculer les valeur[illegible]

D'abord E est égal à la force [illegible] gaz qui fait équilibre à la pression p ; donc $E = p$.

Quant à la masse de l'unité de [illegible]eau (soit 1 m³), elle est égale à $\frac{1,295}{g}$ kg à 0°, et à t° elle est égal[illegible] $\frac{p}{p_0} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t}$, p_0 étant la pression normale, qu'on peut considérer [illegible]nt égale à 10 330 kg par mètre carré. On a donc enfin

$$V = \sqrt{\frac{g \cdot 10\,330\,(1 + \alpha t)}{1,295}},$$

formule indépendante de p. Donc la vitesse du son dans l'air est *indépendante* de la pression atmosphérique et *proportionnelle* à la racine carrée de g et à la racine carrée du binôme de dilatation.

Si l'on fait le calcul de V pour la température 0°, on trouve $V_0 = 280$ m. Cela permet d'écrire la formule sous la forme

$$V = 280\sqrt{1 + \alpha t},$$

laquelle met en évidence l'influence de la température.

Les valeurs de V, calculées par cette formule, ont toujours été plus petites (d'environ 1/6) que les valeurs mesurées par l'expérience. Laplace expliqua cette divergence par une circonstance dont Newton n'avait pas tenu compte : c'est le dégagement de chaleur qui s'effectue, par l'effet de la pression, dans les ondes condensées et qui ne peut se dissiper instantanément à cause de la rapidité de la propagation et de la mauvaise conductibilité calorifique des gaz.

Pour tenir compte de ce fait, il faut multiplier la formule de Newton par le terme correctif $\sqrt{\frac{C}{c}}$, C étant la chaleur spécifique, à pression constante, du gaz dans lequel le son se propage, et c sa chaleur spécifique à volume constant[1]. Pour l'air, ce terme est égal sensiblement à $\sqrt{1,41}$ ou 1,1874, et cette correction rétablit à peu près l'accord avec l'expérience (on a 280.1,1874 = 332.4). Toutefois cette formule ne convient guère que pour le cas des ébranlements très petits, et non pour les sons de grande intensité.

277. Vitesse du son dans les liquides et les solides. — La vitesse du son dans les liquides est beaucoup plus grande que dans l'air.

1. Voir la définition de ces *coefficients dans le livre VIII*, consacré à l'étude de la Chaleur.

Colladon et Sturm ont trouvé, dans des expériences faites en 1827 sur le lac de Genève, que la vitesse du son dans l'eau est de 1435 mètres à la température de 8°,1. C'est plus que le *quadruple* de la vitesse dans l'air. En calculant la vitesse dans l'eau d'après la formule de Newton, qui s'applique directement aux liquides, puisque leur compression ne dégage pas de chaleur appréciable, on a trouvé V = 1425 m à 8°. C'est presque le même nombre.

Dans les solides, la vitesse du son est encore plus grande. Biot a trouvé expérimentalement que, dans la fonte, le son se propage 10 *fois* 1/2 *plus vite* que dans l'air. La vitesse du son dans les autres solides a été calculée par Chladni, Savart, Masson et Wertheim. Chladni a trouvé que, dans les différentes espèces de bois, la vitesse est de 10 *à* 16 *fois plus grande* que dans l'air. Dans les métaux elle est plus variable : elle égale de 4 *à* 16 *fois* la vitesse dans l'air[1].

278. **Mode de propagation du son dans l'air : Idée synthétique du phénomène.** — On peut se faire une idée du mécanisme de la propagation du son dans un milieu élastique, en observant un autre phénomène bien ordinaire, la chute d'une pierre dans une nappe d'eau tranquille.

La pierre tombe, elle frappe l'eau et la déprime d'abord au lieu de la chute ; mais, presque immédiatement, l'eau se relève tout autour du centre de dépression, et il se forme un bourrelet circulaire, qui s'étend lentement en s'agrandissant à la surface de l'eau et qui perd en épaisseur à mesure qu'il gagne en étendue : c'est ce qu'on appelle une *onde condensée*. Pendant que cette onde se propage ainsi à la surface de la nappe d'eau, le liquide s'est relevé au centre et a formé, au lieu de la dépression initiale, une éminence de même volume. Cette petite montagne ne peut se produire qu'autant qu'il se creuse autour d'elle une petite vallée ; d'où il résulte un nouveau bourrelet circulaire, qui est en *creux* au lieu d'être en *relief*, et qui se propage, comme le précédent, par cercles concentriques au centre d'ébranlement. De même que l'on a appelé *onde condensée* celle qui résultait d'une compression,

1. Appliquons, par exemple, la formule $V = \sqrt{\frac{E}{D}}$ au calcul de la vitesse du son dans une tige de fer indéfinie. On a E = 20000 kg au mm² et, par suite, 20000000000 kg au mètre carré. On a

$$D = \frac{7700}{g}; \qquad \text{donc} \qquad V = \sqrt{\frac{9.81.20000000000}{7700}} = 5100 \text{ m};$$

c'est environ quinze fois la vitesse du son dans l'air.

on appelle *onde dilatée* cette dernière, qui résulte d'e[illegible]te de dilatation, sur place, du milieu élastique. L'ensem[illegible] deux ondes contraires constitue une *onde complète*.

Et il faut bien remarquer, dans l'une ou l'autre [illegible] ondes, que *ce n'est pas l'eau qui se déplace* en fuyant le centre, c'est *le mouvement d'oscillation* qui se propage seul dans les couches d'eau concentriques. En effet, on voit un corps léger, tel qu'un morceau de papier, posé [illegible]nt de la nappe d'eau, osciller sur place et suivre le mou[illegible]es ondes qui viennent le soulever ou l'enfoncer alterna[illegible] et ne pas s'éloigner du centre en même temps que celles [illegible]

Voilà ce qui se passe lor[illegible]nl choc a été produit au centre d'ébranlement : une seule [illegible] *lensée* a pris naissance, suivie d'une seule *onde dilatée* ; [illegible]tre des ondes sera déjà redevenu tranquille, l'eau y se[illegible] redevenue immobile comme un miroir, que le mouvement [illegible]uera encore longtemps à la circonférence, toujours cons[illegible]r des ondes, alternativement de sens contraire, qui s'étendent en s'affaiblissant de plus en plus. Mais si le premier choc a été suffisamment intense, — ce qui est le cas ordinaire, — l'eau du centre ne rentrera pas immédiatement en repos ; elle accomplira une série d'oscillations isochrones, comme celles d'un pendule, et qui iront en s'affaiblissant. Toutes ces oscillations donnent naissance à des couples d'ondes condensées et dilatées, que l'on voit courir les unes à la suite des autres sur la surface de l'eau.

Longueur d'onde. — Si l'on examine ces ondes avec attention, par exemple les ondes renflées, qui sont les plus apparentes, on remarque aisément qu'elles sont *équidistantes*. Et il doit en être ainsi, car la distance de deux ondes consécutives est précisément égale à l'espace que le mouvement a parcouru pendant la durée d'une oscillation complète du centre d'ébranlement. Si l'on appelle λ cette distance, T la durée d'une oscillation complète et V la vitesse de propagation dans l'eau, on doit avoir $\lambda = VT$: λ est constant, à la condition que V et T soient constants. C'est ce qu'on appelle une *longueur d'onde*.

Entre deux ondes renflées consécutives, et à égale distance de l'une et de l'autre, se trouve une onde déprimée, où les molécules liquides sont animées de vitesses contraires à celles que possèdent, au même instant, les molécules des ondes voisines. La distance comprise entre une onde renflée et une onde déprimée consécutive est égale à la moitié d'une longueur d'onde $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ et s'appelle une *demi-longueur d'onde*.

Remarque. — On voit en outre que, sur un même rayon, à partir du centre d'ébranlement, deux points distants de $\frac{\lambda}{2}$ seront toujours animés de vitesses de sens contraire ; il en sera de même s'ils sont distants de $3\frac{\lambda}{2}$, $5\frac{\lambda}{2}$... et en général d'un *nombre impair* $(2n+1)$ de $\frac{\lambda}{2}$. Au contraire, deux points distants de λ $\left(\text{ou } 2\frac{\lambda}{2}\right)$, de 2λ ou $\left(4\frac{\lambda}{2}\right)$... et en général d'un *nombre pair* de $\frac{\lambda}{2}$, seront animés de vitesses de même sens.

Ondes sonores. — On peut considérer ce phénomène si simple comme le type des mouvements vibratoires. Celui des corps sonores, qui constitue le son, se propage dans l'air, comme le précédent se propage dans l'eau ; mais, comme les vibrations du corps sonore se transmettent tout autour de lui dans l'atmosphère ambiante, les *ondes sonores* sont sphériques, au lieu d'être circulaires comme les *ondes aqueuses*. De plus, la vibration n'est plus *transversale*, c'est-à-dire perpendiculaire au rayon de l'onde, comme dans l'eau : elle est *longitudinale*, c'est-à-dire dirigée suivant le rayon sonore. Mais les caractères essentiels du mouvement que nous avons étudié, à savoir la *périodicité de la vibration* et la *constance de la vitesse de propagation*, se retrouvent dans l'air comme dans l'eau.

279. **Propagation du son dans l'air : Analyse du phénomène.** — 1° *Cas d'un tuyau sonore.* — Considérons le cas d'un milieu gazeux limité, par exemple un tube ou tuyau MN prismatique (fig. 274) rempli d'air à une pression et à

Fig. 274.

une température constantes. Supposons un diapason qui résonne à l'orifice du tuyau : la branche a vibre comme un pendule entre les deux positions extrêmes a' et a'', et ses vibrations se propagent dans la colonne d'air du tuyau.

Il y a deux phases bien distinctes à considérer : celle de l'aller, entre la position a'' et la position a' de la branche, et celle du retour, entre la position finale a' et la position initiale a''. Pendant la première phase, la branche vibrante communique à l'air du tuyau une série d'impulsions, dont la vitesse, et par suite l'intensité, va d'abord en croissant (depuis a'' jusqu'à a), puis en décroît

sant (depuis a jusqu'à a'). Chacune de ces impulsions successives se propage à travers la colonne d'air, en vertu de l'élasticité de ce gaz. Au moment où la branche arrive en a', et communique sa dernière impulsion, la première impulsion s'est propagée à une distance égale à $\frac{1}{2}$ VT (V étant la vitesse de propagation du son); la région antérieure de la colonne d'air se trouve donc dans un état de condensation particulier sur une longueur égale à $\frac{1}{2}$ VT : c'est ce qu'on appelle l'*onde condensée*. Pendant la deuxième phase de la vibration, la lame vibrante, fuyant devant la couche d'air juxtaposée, lui communique non plus une série d'impulsions, mais une série d'aspirations ou de dilatations, dont la vitesse va d'abord en croissant (entre les positions a' et a), puis en décroissant (entre a et a''). Pendant le même temps, la portion de la colonne d'air qui était précédemment le siège de l'*onde condensée*, est rentrée dans le repos, par suite de la propagation de celle-ci, et elle devient le siège d'une *onde dilatée*, par suite des [illegible]tions qu'elle reçoit successivement pendant la durée $\frac{T}{2}$ de cette deuxi[illegible]ase de la vibration. Donc, au bout du temps T, l'état de la colonne d'[illegible] le suivant : la portion antérieure est le siège d'une onde dilatée sur une [illegible]ongueur $\frac{1}{2}$ VT, et la portion voisine, sur une longueur égale, est le siège de [illegible] première onde condensée, laquelle s'y est transportée; de sorte que, sur u[illegible] longueur VT $= \lambda$, la colonne d'air est le siège d'une onde sonore complète. [illegible]ndant les périodes suivantes, de nouvelles ondes prennent naissance dans [illegible]rtion antérieure du tuyau, tandis que les ondes précédentes se prolongen[illegible]oute sa longueur avec la vitesse constante V. Au bout d'un certain te[illegible] colonne d'air est partagée en tranches de longueur $\frac{\lambda}{2}$, qui sont alternat[illegible]ment le siège d'ondes condensées et dilatées successives.

Représentation graphique de l'état permanent du tuyau sonore. — On peut représenter géométriquement l'état permanent de la colonne d'air vibrante en

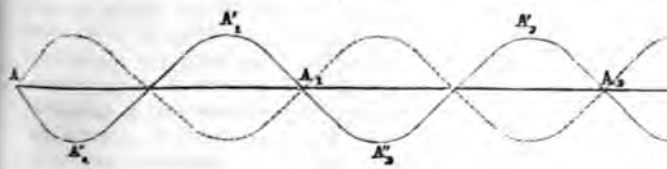


Fig. 275.

élevant sur l'axe même du tuyau une série de perpendiculaires proportionnelles chacune à la vitesse de condensation ou de dilatation de la tranche d'air correspondante (fig. 275).

Ces perpendiculaires ont une longueur nulle aux points A, A_1, A_2..., où la variation de densité est nulle; elles ont une longueur maximum aux points A'_1, A'_2..., et A''_1, A''_2..., où cette variation est la plus grande. Les ordonnées correspondantes aux condensations sont toutes du même côté de l'axe horizontal, les ordonnées correspondantes aux *dilatations sont toutes* de l'autre côté. Leur ensemble *constitue une courbe, en forme de sinusoïde*, composée de boucles *égales, alternativement positives et négatives*. La longueur totale de deux

[illegible] et celle d'une seule bande est égale à $\frac{\lambda}{2}$.

Enfin, chaque portion du tuyau étant successivement le siège d'ondes condensées et d'ondes dilatées, on a figuré cet état à l'aide d'une sinusoïde ponctuée qui est placée symétriquement à la sinusoïde pleine.

2° *Cas d'une atmosphère illimitée.* — On passe aisément du cas précédent à celui d'une atmosphère gazeuse illimitée. La propagation se faisant dans tous les sens à la fois, les condensations et les dilatations successives se transmettent à des surfaces sphériques, concentriques au corps sonore. Les ondes sonores deviennent des sphères; mais leur *longueur d'onde* et leur *vitesse de propagation* sont les mêmes que précédemment. La seule différence, c'est que l'intensité du mouvement vibratoire, se transmettant à une masse d'air de plus en plus grande, diminuera rapidement à mesure que l'onde s'agrandira : d'où il résultera un affaiblissement rapide du son.

280. Réflexion du son. — Lorsque les ondes sonores rencontrent un obstacle, elles reviennent sur elles-mêmes, en formant de nouvelles ondes concentriques qui *semblent émaner* d'un second centre sonore, situé de l'autre côté de l'obstacle : on dit alors que les ondes sont *réfléchies*.

La figure 276 représente une suite d'ondes incidentes réfléchies

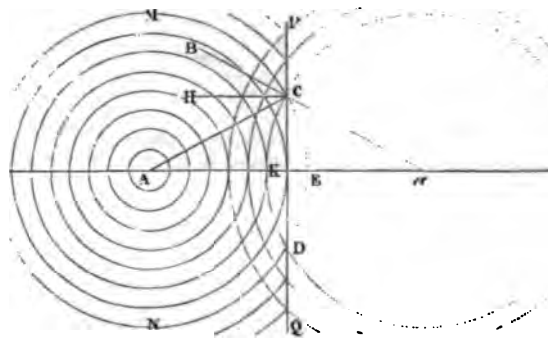


Fig. 276.

sur un obstacle plan PQ. Si l'on considère, par exemple, l'onde incidente MCDN, émise du centre A, l'onde réfléchie correspondante est représentée par l'arc CKD, dont le point *a* est le *centre virtuel*. La droite AC, suivant laquelle se propage le son de A en C, est un *rayon sonore*; et si l'on mène par le point C une perpendiculaire CH à la surface réfléchissante, l'angle ACH que fait le rayon *sonore* avec cette perpendiculaire se nomme *angle d'incidence*; *enfin, l'angle BCH*, que fait le rayon sonore réfléchi BC avec la *même perpendiculaire*, est l'*angle de réflexion*.

La réflexion du son est soumise aux deux lois suivantes (que nous retrouverons les mêmes pour la chaleur et pour la lumière) :

1° *Le rayon sonore incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan, perpendiculaire à la surface réfléchissante.*

2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

On verra plus loin comment ces deux lois se vérifient pour la chaleur au moyen de deux miroirs concaves placés en regard l'un de l'autre à plusieurs mètre[illegible]. On peut les vérifier de la même manière pour le [illegible]pendant une montre au foyer de l'un des miroirs, et [illegible]'oreille au foyer de l'autre. Les tic-tacs de la montre, [illegible] par réflexion du premier miroir au foyer du second, [illegible]ndus distinctement par un observateur qui place en c[illegible]oit son oreille, soit l'orifice d'un petit tube acoustique.

281. **Échos et résonnance**[illegible]prés les lois de la réflexion, le son qui se propage d'abor[illegible] du point A (fig. 276) dans toutes les directions telles que Au, se propage, en outre, après sa réflexion sur PQ, suivant toutes les directions, telles que *a*CB, émanées du point *a*. Il en résulte qu'un observateur placé en B entendra, outre le son parti du point A, un deuxième son qui lui semblera émis dans la direction *a*CB.

On nomme *écho*[1] ce phénomène de la répétition d'un son dans l'air par l'effet de sa réflexion sur quelque obstacle.

Pour un son très bref, comme un choc, il peut y avoir écho lorsque la surface réfléchissante est distante seulement de 17 mètres. Cela résulte de ce fait physiologique qu'une sensation sonore persiste au moins un dixième de seconde. En effet, pendant cet intervalle de temps le son parcourt environ 34 mètres ; si donc un observateur est placé en A, à plus de 17 mètres d'un obstacle, tel qu'un mur K, servant de réflecteur (fig. 277), le son réfléchi parviendra à son oreille après que la sensation du son direct sera éteinte, et il pourra le percevoir, sans aucune confusion, pourvu que l'intensité du son soit suffisante.

Pour les sons articulés il faut au moins une distance double, c'est-à-dire 34 mètres, pour que l'écho soit perçu nettement. Cela est une conséquence de ce fait, facile à constater, qu'on ne peut prononcer ou entendre bien distinctement plus de cinq syllabes par seconde. Or, la vitesse du son étant de 340 mètres par seconde, il s'ensuit que dans un cinquième de seconde le son parcourt 68 mètres. Par conséquent, si l'obstacle réfléchissant est à une distance de 34 mètres, le son, tant pour aller jusqu'à l'obstacle

1. Du grec ἠχώ, son.

que pour en revenir, aura 68 mètres à parcourir. Le temps écoulé entre le son articulé et le son réfléchi sera donc d'un cinquième de seconde; dès lors les deux sons ne se confondront pas, et le son réfléchi sera entendu distinctement.

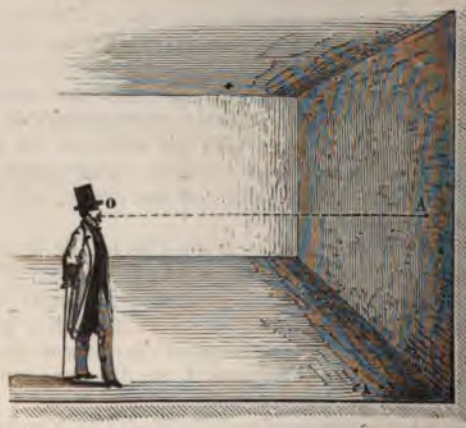


Fig. 277.

Résonnances. — Lorsque la distance de la surface réfléchissante est moindre que 34 mètres pour les sons articulés et que 17 mètres pour les bruits isolés, le son direct et le son réfléchi tendant à se confondre, on ne peut les entendre séparément; mais le son se trouve renforcé et d'autant plus confus qu'une foule de réflexions partielles, émanées de divers points de la même salle, viendront s'ajouter au son principal : on dit alors qu'il y a *résonnance*. C'est ce qu'on observe dans les grands appartements. Les salles nues sont très retentissantes; au contraire, les tentures, les draperies, qui réfléchissent mal le son, rendent les appartements *sourds*.

Échos monosyllabiques et polysyllabiques. — D'après ce qui précède, si l'on parle à voix haute devant un réflecteur distant de 34 mètres, l'écho ne répétera que la dernière syllabe prononcée; l'écho est donc *monosyllabique*. Si le réflecteur est distant de deux fois, trois fois 34 mètres, l'écho sera *dissyllabique*, *trissyllabique* : il répétera deux, trois syllabes successives.

Échos multiples. — On nomme *échos multiples* ceux qui répètent *plusieurs fois* le même son : c'est ce qui arrive lorsque deux *obstacles placés* l'un vis-à-vis de l'autre, deux murs parallèles par

exemple, se renvoient successivement le son. Il existe des échos qui répètent ainsi jusqu'à vingt ou trente fois le même son. On cite particulièrement celui du château de Simonetta, près de Milan, qui répète *quarante fois* un mot prononcé entre les deux ailes parallèles de l'édifice.

Remarques. — 1° L'existence des échos est une conséquence, et dès lors une preuve expérimentale, de la réflexion du son. Ce n'est pas seulement sur des surfaces planes, comme les murs des édifices, qu'elle s'opère; dans plusieurs

Fig. 278.

circonstances, la réflexion se produit sur des surfaces courbes, telles que des voûtes d'églises ou d'édifices, et y donne naissance à des échos très nets.

Ainsi, il arrive quelquefois que, lorsqu'on parle sous une arche d'un pont de pierre, la face tournée contre l'une des piles, la voix se reproduit près de l'autre pile avec assez d'intensité pour qu'on puisse entretenir une conversation à voix basse sans être entendu par les personnes placées dans l'espace intermédiaire.

La figure 278 représente une crypte d'église à voûte elliptique, dans laquelle ce genre d'écho est à la fois indiqué et expliqué par la réflexion des rayons sonores, qui viennent de l'un des foyers de l'ellipse et sont renvoyés à l'autre foyer. Le musée des Antiques au Louvre possède une salle de ce genre. Il existe également au rez-de-chaussée du Conservatoire des Arts et Métiers de Paris une salle carrée, *à voûte elliptique, où l'on constate* ce phénomène d'une manière *remarquable, lorsqu'on se place aux deux foyers* de l'ellipse.

282. **Réfraction du son.** — On verra plus tard qu'on entend par *réfraction* un changement de direction qu'éprouvent la lumière et la chaleur en passant d'un milieu dans un autre. Or Sondhauss a constaté que les ondes sonores se réfractent comme la chaleur et la lumière.

Lentille de Sondhauss. — On coupe sur un grand ballon de collodion deux segments égaux, et on les fixe sur les deux faces d'un anneau de tôle ayant 31 centimètres de diamètre de manière à former une lentille biconvexe, creuse, dont l'épaisseur au centre est d'environ 12 centimètres. Puis, remplissant d'acide carbonique la lentille ainsi formée, on place une montre sur la direction de l'axe, et l'on cherche ensuite, de l'autre côté de la lentille, le point où le bruit de la montre est entendu avec le plus d'intensité. On observe ainsi que, tant que l'oreille est éloignée de l'axe, le son est à peine perceptible; mais que, lorsqu'elle est sur l'axe, à une distance convenable de la lentille, le son est entendu très distinctement : ce qui prouve que les ondes sonores ont été réfractées suivant les mêmes lois que la lumière et la chaleur.

283. **Circonstances qui font varier l'intensité du son.** — Ce sont : la distance du corps sonore, l'amplitude des vibrations, la densité de l'air dans le lieu où le son se produit, la direction des courants d'air, et enfin le voisinage d'autres corps sonores.

1° *L'intensité du son varie en raison inverse du carré de la distance du corps sonore.* Cette loi est une conséquence théorique du mode de propagation du son dans un milieu indéfini (279, 2°). On a vu, en effet, que l'ébranlement moléculaire, produit par le corps sonore vibrant dans l'air, se propage sur des sphères concentriques, dont les surfaces varient proportionnellement au carré de leurs rayons. Par conséquent, sur une surface déterminée, telle que l'oreille d'un expérimentateur, la quantité de force vive qui sera transmise à diverses distances variera en raison inverse des surfaces sphériques correspondantes et, par suite, *en raison inverse des carrés des distances au corps sonore.*

2° *L'intensité du son augmente avec l'amplitude des vibrations du corps sonore.* La relation qui existe entre l'intensité du son et l'amplitude des vibrations se constate aisément en faisant vibrer des cordes métalliques assez longues pour que leurs oscillations soient sensibles à l'œil : on vérifie alors que le son s'affaiblit lorsque l'amplitude des oscillations décroît.

3° *L'intensité du son dépend de la densité de l'air à l'endroit où il se produit.* Dans l'hydrogène, qui est environ 14 fois moins dense que l'air, les sons ont une intensité beaucoup plus faible,

quoique la pression soit la même. Dans l'acide carbo[illegible] au contraire, dont la densité, par rapport à l'air, est de [illegible] les sons deviennent plus intenses. Sur les hautes mo[illegible] ir est très raréfié, il faut parler avec force pour se [illegible], et l'explosion d'une arme à feu n'y produit qu'un [illegible]

4° *L'intensité du son est modifiée par l'agitation d[illegible] la direction des vents.* On constate que par un temps [illegible] se propage toujours mieux q[illegible] ce dernier cas le son est pl[illegible] la direction du vent que dans [illegible]ction contraire.

5° *Le son est renforcé pa[illegible]inage d'un corps sonore.* Une corde d'instrument, tendue [illegible] et loin de tout corps sonore, ne rend qu'un son fai[illegible] elle soit tendue au-dessus d'une caisse sonore, comm[illegible] guitare, le violon ou la basse, elle rend un son plein et [illegible]. Cela est dû à ce que la caisse et l'air qu'elle contient vi[illegible] à l'unisson avec la corde. De là l'emploi des caisses sonore[illegible] les instruments à cordes.

284. **Renforcement du son par les tuyaux.** — L'intensité du son ne varie plus en raison inverse du carré de la distance lorsque la transmission s'effectue dans des tuyaux, surtout si ceux-ci sont cylindriques et droits. Les ondes sonores ne se propageant plus alors sous la forme de sphères concentriques croissantes, le son peut être porté à une distance considérable sans diminution bien sensible. Biot a constaté que, dans un tuyau de conduite des eaux de Paris, long de 951 mètres, la voix perd si peu de son intensité, que d'une extrémité à l'autre de ce tuyau on peut entretenir une conversation à voix basse. Toutefois l'affaiblissement du son devient sensible dans les tubes d'un grand diamètre, ou dans ceux dont les parois présentent des anfractuosités. C'est ce qu'on observe dans les souterrains et dans les longues galeries. On a fait de nombreuses applications pratiques de cette propriété des tubes et des tuyaux.

285. **Speaking-tubes.** — L'une des plus connues est l'emploi des *tubes acoustiques* ou *speaking-tubes*, pour converser à distance. Ce sont de véritables *téléphones* acoustiques, mais à courte portée.

Ils consistent ordinairement en tubes cylindriques, flexibles, en caoutchouc, qui se terminent par deux embouchures en os ou en ivoire; un sifflet peut s'emboîter dans chacune des embouchures. On souffle d'abord dans le tube, pour prévenir, par un coup de sifflet, la personne avec qui l'on veut converser. Celle-ci siffle de la même manière, pour répondre qu'elle est à son poste, puis place l'embouchure à son oreille, pendant que l'interlocuteur parle à voix basse dans l'autre embouchure.

286. **Porte-voix.** — C'est un instrument fondé à la fois sur le renforcement et sur la facile transmission *du son par les tuyaux.*

Le porte-voix, *ainsi que l'indique son nom, est destiné à* transmettre la voix à

distance. C'est un tube de fer-blanc ou de laiton (fig. 279), légèrement conique et très évasé à l'une de ses ouvertures, qu'on nomme *pavillon*. L'instrument s'embouche par l'autre extrémité; il *porte* la voix d'autant plus loin que ses dimensions sont plus grandes.

Les porte-voix en usage dans la marine ont jusqu'à 2 mètres de longueur, avec un pavillon dont le diamètre atteint 50 cm. Un bon porte-voix peut faire entendre

Fig. 279.

des sons à 5 ou 6 kilomètres, surtout des sons non articulés. On explique, en général, les effets du porte-voix par une suite de réflexions successives des ondes sonores sur les parois du tube, réflexions en vertu desquelles les ondes tendent à sortir et à se propager suivant une direction parallèle à l'axe de l'instrument.

On a objecté à cette théorie que les sons émis dans l'instrument ne sont pas renforcés seulement dans la direction de son axe, mais dans toutes les directions. On a dit encore que le pavillon est inutile pour obtenir le parallélisme des rayons sonores, tandis qu'au contraire il exerce une influence considérable sur l'intensité des sons transmis. Enfin, lorsqu'on double d'une étoffe de laine l'intérieur du porte-voix, la force en est peu diminuée. Les effets de cet instrument seraient donc dus plutôt à un renforcement produit par la colonne d'air qui vibre dans le tube à l'unisson du son émis dans l'embouchure. Quant à l'effet du pavillon, on n'en a point donné jusqu'ici d'explication satisfaisante.

287. **Cornet acoustique.** — Le *cornet acoustique* est utilisé par les personnes

Fig. 280.

qui ont l'oreille dure. C'est un tube conique de métal, dont l'une des extrémités, *terminée en pavillon*, est destinée à recevoir le son, tandis que l'autre extrémité

est introduite dans l'oreille. Le pavillon sert ici d'embouchure, c'est-à-dire qu'il reçoit les sons venant de la bouche de la personne qui parle. Ces sons se transmettent par une suite de réflexions dans l'intérieur du cornet, en sorte que les ondes qui eussent pris un grand développement se trouvent concentrées dans l'appareil auditif, et y produisent un effet beaucoup plus sensible que ne l'eussent fait des ondes divergentes. La figure 280 (1, 2, 3, 4, 5 et 6) montre une série de cornets de formes différentes.

288. **Audiphone.** — C'est un petit appareil destiné, comme le cornet acoustique, à faciliter, et même à *permettre* l'audition aux personnes plus ou moins atteintes de surdité. Il est fondé sur la grande conductibilité des corps solides pour le son.

Le premier instrument de ce genre est dû à un Américain, M. R. G. Rhodes, de Chicago. C'est une sorte d'écran en caoutchouc durci, dont la lame est courbée à son extrémité. La personne tient l'instrument par son manche et applique la courbure de la lame contre les dents de sa mâchoire supérieure.

M. Colladon a simplifié cet instrument et l'a rendu, par suite, moins coûteux et plus pratique, en remplaçant le caoutchouc durci par du carton, de l'espèce connue dans le commerce sous le nom de *carton à satiner* ou *carton d'orties*. Une simple feuille, d'une épaisseur de 1 millimètre, taillée dans ce carton, sans manche ni autres accessoires, constitue l'audiphone (fig. 281, I et II). On prend à la main le bord rectiligne et l'on appuie le bord convexe contre la mâchoire supérieure, de manière à donner à la feuille une courbure convenable.

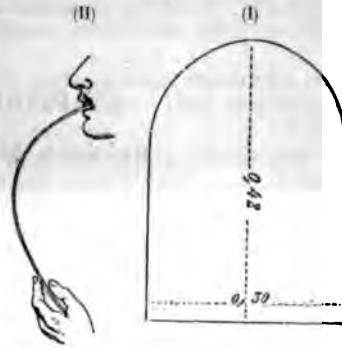


Fig. 281.

289. **Stéthoscope.** — On nomme ainsi un petit instrument dont on se sert en

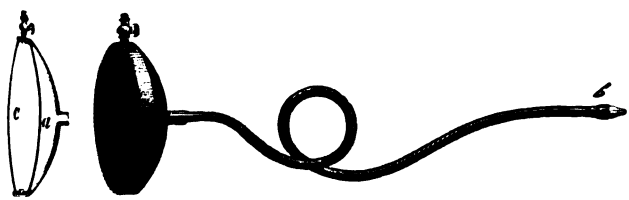


Fig. 282. Fig. 283.

médecine pour ausculter les malades. On en a imaginé plusieurs. Nous donnons ci celui qui est construit par Kœnig.

C'est une espèce de cornet acoustique consistant en une capsule de cuivre ermée par une *membrane de caoutchouc c*, et divisée à l'intérieur en deux *compartiments par une seconde membrane a*, de manière qu'en insufflant, par *robinet latéral, de l'air entre les deux membranes*, elles prennent la forme

d'une lentille biconvexe, comme le montre, en coupe, la figure 282. Du centre de la capsule de cuivre part un tuyau de caoutchouc terminé par un bout de corne ou d'ivoire *b*. Le médecin introduit le bout du tube dans son oreille (fig. 283), tout en appliquant la membrane *c* sur la poitrine du malade : les battements du cœur et les bruits de la respiration se transmettent fidèlement à l'air renfermé dans la chambre *ac*, et de là à l'oreille par le tuyau de caoutchouc. On peut même s'ausculter soi-même. Si plusieurs tuyaux sont adaptés à l'appareil, autant d'observateurs peuvent ausculter simultanément le même sujet.

CHAPITRE II

HAUTEUR DU SON

—

MESURE DU NOMBRE DES VIBRATIONS.

290. **Qualités du son musical.** — Le *son* proprement dit, ou *son musical*, est le résultat de vibrations continues, rapides et *isochrones*, qui produisent sur l'organe de l'ouïe une sensation prolongée. On peut toujours le comparer à d'autres sons musicaux.

L'oreille distingue dans tout son musical trois qualités spécifiques : la *hauteur*, l'*intensité* et le *timbre*.

Hauteur. — La *hauteur* est la qualité qui résulte, pour l'organe de l'ouïe, de la rapidité plus ou moins grande du mouvement vibratoire, origine du son.

On nomme *sons graves* ceux qui correspondent à un petit nombre de vibrations par seconde, et *sons aigus* ceux qui correspondent à un grand nombre de vibrations. Tous les sons ne sont graves ou aigus que d'une manière relative. Toutefois on dit un *son grave* ou un *son aigu*, comme on dit une *basse température* ou une *température élevée*, en comparant le son à ceux qu'on entend le plus ordinairement.

Nous avons défini la *hauteur* par sa cause physique ; on peut la définir aussi par la sensation physiologique, et dire que c'est la qualité qui distingue entre eux les sons de même intensité, produits par un même instrument.

Intensité. — On a vu (283, 2°) que l'*intensité*, ou la *force* du son, dépend de l'amplitude des oscillations et non de leur nombre : un même son peut conserver le même degré de gravité ou

d'acuité, et prendre une intensité plus ou moins grande, lorsqu'on fait varier l'amplitude des oscillations. C'est ce qui arrive pour une corde tendue, qu'on écarte plus ou moins de sa position d'équilibre.

Timbre. — Le *timbre* est la qualité par laquelle deux sons provenant de deux instruments différents restent parfaitement distincts, tout en ayant même hauteur et même intensité. Le son du hautbois, par exemple, [illegible] s distinct de celui de la flûte; le son du cor, de celui d[illegible]. De même la voix humaine présente un timbre bien d[illegible] suivant les individus, l'âge ou le sexe.

Nous verrons que le tim[illegible]ticulier qui caractérise un son déterminé est dû aux so[illegible]moniques (304) plus ou moins nombreux qui l'accompagn[illegible]ujours.

291. **Méthodes diverse[illegible] mesurer le nombre des vibrations.** — Il n'y a pas d'aut[illegible]en de démontrer que la hauteur d'un son dépend du nom[illegible] de ses vibrations, que de mesurer ce nombre et de comparer les divers sons à ce point de vue. On peut employer plusieurs méthodes :

1° La *méthode acoustique* ou *procédé de la sirène* ;
2° La *méthode graphique* ou *procédé de Duhamel* ;
3° La *méthode optique* ou *procédé de Lissajous* ;
4° La *méthode des flammes manométriques* ou *procédé de Kœnig.*

Ces dernières servent plutôt à comparer les sons entre eux qu'à en mesurer les nombres absolus de vibrations. Nous n'exposerons ici que les deux premières.

292. **Méthode acoustique. — Sirène de Cagniard de Latour.** — La *méthode acoustique* s'applique à l'aide d'un petit instrument, appelé *sirène*[1].

Description. — La figure 284 représente la sirène montée sur le *sommier* E d'une *soufflerie* (294). A la partie inférieure de l'instrument, qui est tout en cuivre, est une caisse cylindrique O, recouverte d'un plateau fixe B. Sur ce plateau s'appuie une tige verticale T, à laquelle est fixé un disque A, qui peut tourner librement avec la tige; des trous circulaires équidistants sont pratiqués dans le plateau B, et dans le disque A se trouvent un nombre égal de trous de même grandeur et à la même distance du centre que ceux du plateau. Ces trous ne sont point perpendiculaires aux surfaces du plateau et du disque; mais, les uns étant tous inclinés d'un même angle et dans le même sens, les

1. Cagniard de Latour, qui en est l'inventeur, lui a donné le nom de *sirène*, parce qu'on peut lui faire rendre des sons, le *faire parler*, comme on dit, dans l'eau.

autres sont tous inclinés en sens contraire, de manière que, lorsque les trous du plateau et ceux du disque sont en regard, ils sont opposés l'un à l'autre. Il résulte de cette disposition que, lorsqu'un courant d'air rapide arrive de la soufflerie dans la caisse cylindrique et dans le trou *m*, il frappe obliquement les parois du trou *n*, et imprime au disque A un mouvement de rotation dans le sens *An*.

Théorie. — Pour simplifier l'explication, supposons d'abord que le disque mobile A porte 18 trous et que le plateau fixe B ne soit percé que d'un seul. Considérons le cas où le trou intérieur

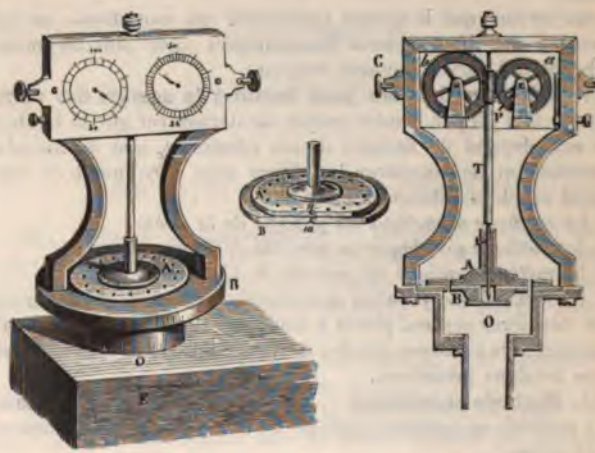


Fig. 284. Fig 285. Fig. 286.

coïncide avec l'un des trous supérieurs. Le vent de la soufflerie vient alors frapper obliquement celui-ci et le disque mobile se met à tourner. Le plein qui se trouve entre deux trous consécutifs vient alors fermer le vide du plateau inférieur; mais le disque continue à tourner, en vertu de sa vitesse acquise, et deux trous se trouvent de nouveau en regard, d'où résulte une nouvelle impulsion, et ainsi de suite. Donc, pendant une révolution complète du disque, l'orifice inférieur est 18 fois ouvert et 18 fois fermé. Il en résulte 18 impulsions par tour, qui font entrer l'air en vibration, et produisent un son dès que le disque tourne assez vite.

Si l'on suppose, comme cela existe réellement, que le plateau

fixe B ait 18 trous comme le disque tournant, le pl[illegible]ibra-toire se produira exactement de la même façon, [illegible] les 18 trous seront successivement fermés et ou[illegible]*ème temps*; les 18 trous vibreront donc à l'unisson; le [illegible] se[illegible] *fois plus intense*, mais le nombre des vibrations *n'en sera* [illegible] *augmenté*. Dans les deux cas, il est de 18 vibrations données par chaque révolution du disque A.

Usage : Application de [illegible] *e* [illegible] *que.* — Il reste à compter les tours que fait [illegible] t une seconde. La tige T porte une vis sans f[illegible] mouvement à une roue *a* garnie de 100 dents [illegible] vancer d'une dent pour chaque révolution du [illegible] roue *a* porte un taquet P, celui-ci, à chaq[illegible] d'une dent une seconde roue dentée *b*. A[illegible] t fixées deux aiguilles qui se meuvent s[illegible] ent, l'une le nombre des tours du disqu[illegible] tours. Deux boutons D et C servent à [illegible] er à volonté la petite roue *a* avec la vis [illegible].

Comme le son s'élève à mesure que la vitesse du disque A s'accroît, il suffit de forcer le vent de la soufflerie pour faire rendre à l'appareil un son déterminé. On maintient alors la vitesse constante pendant un certain temps, 20 secondes par exemple ; puis on lit les indications des deux cadrans. Soit n le nombre des unités de tour, et c celui des centaines : le nombre N des vibrations par seconde sera donné par la formule

$$N = \frac{18\,(n + 100\,c)}{20}.$$

Remarque. — On a constaté que la sirène, à vitesse égale, donne le même son dans l'eau que dans l'air ; il en est de même dans les gaz : cela prouve que la hauteur d'un son déterminé ne dépend que *du nombre* des vibrations, et non *de la nature* du corps sonore.

295. **Sirène de Seebeck.** — On peut appliquer la même méthode à l'aide d'une autre *sirene*, construite par Seebeck, un peu plus compliquée, mais fondée sur le même principe (fig. 287). Le son est produit par un courant d'air qui passe d'une manière discontinue par les trous d'un disque tournant. Ce disque est généralement en carton et porte sur sa circonférence plusieurs séries de trous plus ou moins nombreux. Il est animé d'un mouvement très régulier à l'aide d'un mécanisme d'horlogerie contenu dans un socle en bois. Le système est porté sur un *sommier*, ou réservoir à vent, qui distribue le courant d'air, par l'intermédiaire d'un *porte-vent* en *caoutchouc, à celle* des séries de trous sur laquelle on *veut expérimenter*.

On peut d'ailleurs placer une série d'autres disques sur l'appareil, ce qui permet de varier les expériences.

294. **Soufflerie.** — L'appareil qui sert à faire *parler* la sirène, et en général toute espèce de tuyaux sonores, s'appelle une *soufflerie*. Il se compose d'un soufflet S, qui est placé entre les quatre pieds d'une table et qui fonctionne au moyen d'une pédale P (fig. 288). L'air refoulé se rend dans un réservoir de

Fig. 287.

cuir B, très flexible, qui se gonfle peu à peu. Comprimé par deux plaques de plomb qui chargent le réservoir, l'air passe ensuite par un tuyau A dans une boîte *mn*, placée sur la table, qu'on nomme le *sommier*. Cette boîte sert à la fois de support et de *distributeur de l'air* pour les tuyaux. Les trous dans lesquels s'engagent les embouchures des tuyaux sont fermés par des soupapes *s* (fig. 289) qui s'opposent au passage de l'air; mais devant chaque tuyau est une touche *a*, qui, lorsqu'on appuie dessus, fait ouvrir la soupape et laisse passer l'air. Chaque soupape est munie d'un ressort *r*, qui la relève automatiquement dès qu'on cesse d'appuyer sur la touche.

295. **Roue dentée de Savart.** — On peut encore appliquer la méthode acoustique à l'aide d'un autre instrument, dû à Savart, la roue dentée. Les sons se produisent à l'aide d'une carte que l'on appuie fortement à la main contre les

bords d'une roue métallique dentée, qu'on fait tourner plus ou moins vite à l'aide d'une grande roue à manivelle. Il se produit *une vibration double* à chaque passage d'une dent : le nombre des vibrations qui se produisent en un temps donné dépend donc à la fois du nombre des dents de la roue et de sa vitesse de rotation ; il est mesuré automatiquement à l'aide d'un compteur spécial, analogue à celui de la sirène.

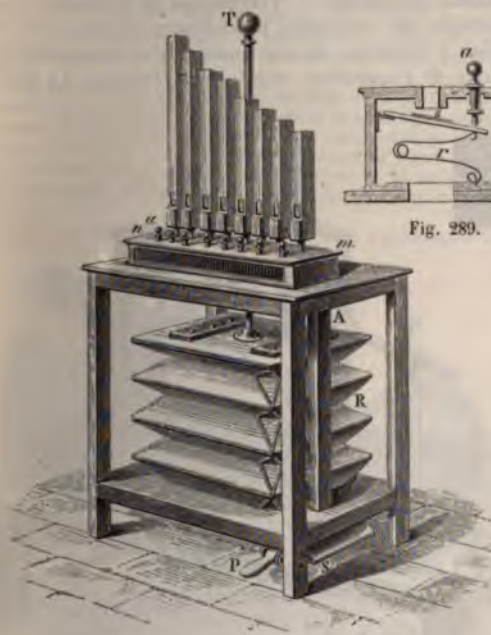


Fig. 289.

Fig. 288.

Pour produire les *sons graves*, Savart substituait à la roue dentée une simple barre de fer, de 65 centimètres de longueur. Dans l'un et l'autre cas, ces sons étaient de très mauvaise qualité.

296. **Limite des sons perceptibles.** — On admettait avant Savart que l'ouïe cesse de percevoir les sons au-dessous de 16 vibrations doubles par seconde et au-dessus de 9000. Mais les travaux de Savart ont démontré que ces limites sont trop resserrées, et que la possibilité de percevoir des sons plus graves ou plus aigus dépend plutôt de leur intensité que de leur hauteur. A l'aide de sa roue dentée, Savart a pu rendre perceptibles des sons aigus

de 24 000 vibrations doubles par seconde et des sons graves de 8 vibrations doubles.

Despretz, à l'aide d'une série de *diapasons* (310), accordés à l'octave les uns des autres, a trouvé 16 vibrations doubles pour limite des sons graves, et 36 850 pour limite des sons aigus[1].

297. **Méthode graphique. — Vibroscope de Duhamel.** — Dans l'une quelconque des méthodes précédentes, il faut faire parler un son connu à l'*unisson* du son inconnu, et l'appréciation de l'unisson exige de l'opérateur une oreille exercée. La méthode

Fig. 291.

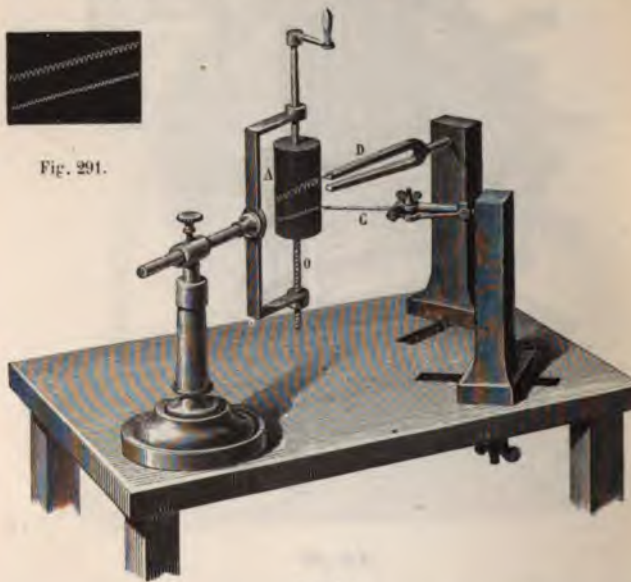


Fig. 290.

graphique ne présente pas cette difficulté. Elle consiste, en effet, à tracer les vibrations mêmes du corps sonore sur une surface convenablement préparée. On n'a plus ensuite qu'à compter ces vibrations, qui sont inscrites sous la forme de sinuosités parfai-

1. Cela fait 73700 vibrations simples, qui correspondent à $ré_{10}$ (ut_1 étant représenté par 128 vibrations) (311). L'oreille était d'ailleurs péniblement affectée par la perception de ce son extrême, qui dépasse de beaucoup la limite des sons musicaux. D'après M. Helmholtz, les sons d'un bon emploi en musique sont compris entre 40 et 4000 vibrations doubles, soit une étendue de 7 octaves.

tement visibles à l'œil nu. Le dispositif qui sert à produire cette inscription est dû, ainsi que la méthode elle-même, à Duhamel : on l'appelle *vibroscope*.

Description du vibroscope. — Cet appareil consiste en un cylindre A, de bois ou de métal, fixé à un axe vertical O (fig. 290) taillé en forme de vis et engagé dans un écrou : de sorte que, en le faisant tourner à l'aide d'une manivelle, on le fait monter ou descendre dans un sens ou dans l'autre. Autour du cylindre est enroulée une feuille de papier sur laquelle on a déposé une couche légère et non adhérente de noir de fumée. C'est sur cette couche que s'inscrivent les vibrations.

Le corps sonore étant, par exemple, une lame élastique C, solidement encastrée par une de ses extrémités, on fixe à l'autre un style léger qui rase la surface du cylindre pendant sa rotation. Si celui-ci tourne sans que la lame vibre, le style trace en blanc sur le fond noir un trait hélicoïdal régulier; mais si la lame vibre, le trait est ondulé, et toutes les vibrations de la lame correspondent à autant d'ondulations. Il ne reste plus qu'à déterminer la durée du son enregistré.

On peut y arriver de plusieurs manières. La plus simple consiste à comparer

Fig. 292.

la courbe tracée par la lame vibrante à une autre courbe, qu'on trace parallèlement à la première à l'aide d'un diapason donnant par seconde un nombre de vibrations connu. Une des branches du diapason D étant, elle aussi, munie d'un style léger, on met celui-ci en contact avec le noir de fumée, puis on fait vibrer simultanément la lame et le diapason; les deux styles tracent alors deux hélices ondulées, mais inégales. Une fois la feuille de papier déroulée (fig. 291), on *compare les nombres de sinuosités* qui se correspondent sur les deux *courbes et l'on en déduit le nombre* de vibrations par seconde du son inconnu.

298. **Phonautographe.** — Le vibroscope de Duhamel et les appareils enregistreurs analogues ne permettent d'inscrire que les mouvements vibratoires simples, tels que ceux d'un diapason, d'une verge métallique, etc. Un autre appareil enregistreur, le *phonautographe*[1], permet d'inscrire les vibrations compliquées des ondes sonores aériennes. Il se compose d'un large paraboloïde, en porcelaine ou en faïence (ou en toute autre substance peu élastique), qui est coupé dans le plan de son foyer (fig. 292). On ferme cet orifice par une membrane élastique, munie d'un style sur sa face extérieure. Les ondes aériennes, provenant d'un corps sonore qu'on fait résonner à l'embouchure du paraboloïde, sont concentrées par les parois mêmes de celui-ci sur la membrane du plan focal. Celle-ci entre en vibration, et inscrit les mouvements complexes qu'elle reçoit sur un cylindre enregistreur, qui tourne uniformément, par un mouvement d'horlogerie, à la portée du style mobile. On obtient ainsi des courbes plus ou moins compliquées, qui constituent une sorte d'*écriture acoustique* des sons émis par le corps sonore.

299. **Phonographe.** — Le *phonographe*, inventé par M. Edison en 1877, peut être considéré comme un perfectionnement du phonautographe. C'est un appareil enregistreur qui inscrit les ondes aériennes, non plus sur du papier noirci, mais sur une feuille métallique : celle-ci en conserve les empreintes, qui permettent, à leur tour, de reproduire à volonté les sons auxquels elles correspondent.

L'ancien modèle (fig. 293) se composait d'un cylindre de laiton A, monté sur un axe D, qui est muni d'un pas de vis sur la moitié de sa longueur. Sur le

Fig. 293.

cylindre est tracée une rainure hélicoïdale de même pas que la vis D. Par suite, lorsqu'on fait tourner le cylindre au moyen de la manivelle M, à chaque tour la rainure avance d'une longueur égale à son pas. Sur la rainure est appliquée une feuille d'étain ou de cuivre très mince, qui l'enveloppe. Enfin, en avant du cylindre est un *parleur* ou embouchure B, destiné à recueillir et à concentrer les ondes sonores (fig. 294) sur une plaque vibrante *r*, qui remplace la membrane de Scott; celle-ci s'appuie directement sur un tube de caoutchouc *e*, et ce dernier sur une lame *i*, terminée par un poinçon d'acier. Ce poinçon doit jouer le même rôle que le style du phonautographe; il rase la feuille d'étain, et il est ajusté de manière à correspondre à la rainure pendant sa rotation.

Fonctionnement. — Lorsqu'on parle à haute voix dans l'embouchure, en ayant soin de tourner en même temps la manivelle M de gauche à droite, la

1. *Inventé par un ouvrier mécanicien*, appelé Scott.

plaque r vibre alors à l'unisson de la voix et ses vibrations se transmettent à la lame i et au poinçon, qui trace, sur la feuille métallique, un gaufrage plus ou moins saillant.

Lorsqu'on veut faire parler le phonographe, on commence par amener en avant l'embouchure B à l'aide d'une poignée n; puis, faisant tourner la manivelle de droite à gauche, on ramène le cylindre à sa première position et l'on remet en place l'embouchure; on tourne alors, comme précédemment, de gauche à droite : le cylindre avance de nouveau, et c'est alors que l'appareil se met à répéter à haute voix les paroles enregistrées. Dans la première partie de l'expérience, c'est la membrane vibrante qui a agi sur le poinçon, et celui-ci sur la feuille d'étain; maintenant il se produit un phénomène de *reversibilité* : c'est le gaufrage de la feuille qui réagit sur le poinçon, et la lame i de ce dernier sur le caoutchouc et sur la lame r, et celle-ci, recevant ainsi exactement les mêmes vibrations que la première fois, reproduit les mêmes sons.

Fig. 294.

300. **Phonographe perfectionné** (modèle de 1889). — La feuille d'étain est remplacée par un manchon en cire m ou m' (fig. 295) ayant environ 12 centimètres

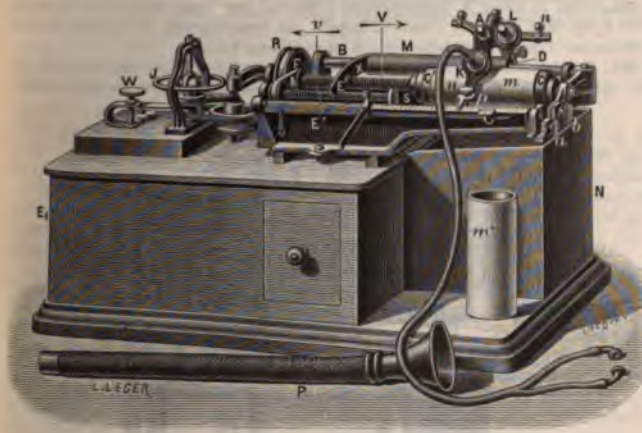


Fig. 295.

de longueur et 5 centimètres de diamètre. Le noyau CC', légèrement conique, sur lequel est enfilé le manchon est solidaire d'une vis V dirigée suivant son axe et dont le pas est de un quart de millimètre. Cette vis reçoit d'un moteur électrique renfermé dans la boîte E_1, un mouvement de rotation bien uniforme, d'environ 60 ou 100 tours, selon qu'il s'agit d'inscrire la parole ou la musique.

On voit en *F R J W le régulateur et les organes de transmission*. Grâce au *bras X et au tube M, la pièce LK peut se mouvoir parallèlement aux génératrices*

du manchon, vers la gauche ou vers la droite de la figure, selon que ce bras est rendu solidaire de la vis V par le peigne E, ou de la vis v par E'. La manœuvre s'effectue au moyen des boutons a, b.

La pièce K, très importante, est formée d'un levier coudé à angle droit, mobile autour de la charnière A; les deux bras du levier portent respectivement l'inscripteur L et le reproducteur K. Le disque vibrant m (fig. 296) communique

Fig. 296.

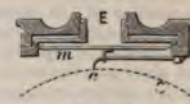


Fig. 297.

ses vibrations à un petit couteau très tranchant c par l'intermédiaire d'un tampon de caoutchouc et de lames formant ressort. Le disque vibrant m du reproducteur (fig. 297) reçoit ses mouvements d'une pointe mousse c qui suit les traces laissées sur la surface S par le couteau.

Les vis n permettent de régler la pénétration des stylets dans la cire. On peut, au moyen d'un couteau spécial, enlever les traces d'une inscription antérieure et faire servir le manchon de cire à une nouvelle opération. La cire enlevée tombe dans le tiroir N. L'inscription s'effectue par l'intermédiaire d'un porte-voix P (fig. 295) placé sur l'embouchure E. La reproduction est rendue bi-auriculaire par l'emploi des tubes acoustiques à fourche.

301. **Graphophone.** — L'enregistrement et la reproduction de la parole ont été également obtenus à l'aide du *graphophone*, inventé par le professeur Tain-

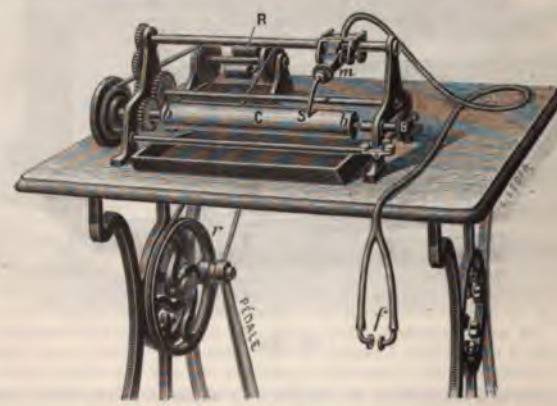


Fig. 298.

ter (fig. 298). Le but de l'inventeur a été surtout de réaliser un phonographe *aussi parfait que celui* d'Edison, mais plus simple et moins coûteux. Aussi a-t-il *employé un mécanisme* des moins compliqués, qui est mis en action sans le *secours de moteur* électrique ou autre, à l'aide d'une simple pédale, ce qui

permet, après quelques minutes d'essai, à la personne la plus inexpérimentée, de se servir très facilement de l'appareil.

Le graphophone comporte quatre parties distinctes : 1° le système mécanique d'entraînement du cylindre ; 2° le système enregistreur (*recorder*) ; 3° le système répétiteur (*reproducer*) ; 4° le système moteur et régulateur de vitesse R.

L'entraînement du cylindre C est produit par un axe horizontal sur lequel est fixée une poulie que fait tourner une petite corde actionnée par la pédale. Deux petits boutons, placés à droite, permettent d'embrayer ou de désembrayer à volonté. Les cylindres C sont en carton recouverts de cire et ont 15 cm de long et 52 mm de diamètre. Leur vitesse angulaire normale est de 180 à 190 tours par minute. Le cylindre employé pour recevoir l'inscription se place entre deux pièces demi-sphériques *bb* qui assurent un centrage parfait et une mise en place rapide.

L'appareil enregistreur se compose essentiellement d'une mince lame de mica sur laquelle est fixée une lame coupante qui vient s'appliquer sur le cylindre recouvert de cire. La plaque de mica est maintenue, à sa périphérie, dans une monture de bronze portant un pas de vis qui vient s'engager sur la vis horizontale servant à l'entraînement longitudinal du système enregistreur.

Fig. 299.

Le *répétiteur*, se substituant à l'*enregistreur* (fig. 299), diffère entièrement de ce dernier et se compose d'un petit appareil en ébonite SM dont l'extrémité se termine par une légère pointe en acier *a*, articulée comme un levier, dont l'une des extrémités s'appuie sur le cylindre et porte un fil tendu *f*, attaché au centre d'un mince disque de celluloïd *d* de 18 à 20 mm de diamètre seulement. La petite pointe en acier, rencontrant la surface accidentée de la rainure produite sur le cylindre par la lame coupante du système enregistreur, transmet ses vibrations au petit disque de celluloïd par l'intermédiaire du fil tendu, et de là, par un tuyau en caoutchouc, à deux petits cornets qui se placent dans les oreilles de l'auditeur.

Le système moteur entraînant le cylindre se compose de deux plateaux de friction recouverts d'une composition succédanée du cuir. Ces deux plateaux restent en contact jusqu'au moment où la vitesse angulaire de l'appareil est suffisante. A partir de ce moment, un régulateur à force centrifuge agit pour séparer le plateau fixé sur l'arbre moteur à pédale du plateau fixé sur l'axe commandant le graphophone, et oblige ainsi l'axe de la pédale à tourner à vide et à ne plus entraîner l'arbre de l'appareil jusqu'au moment où la vitesse se ralentit assez pour produire de nouveau l'embrayage par le rapprochement des plateaux.

CLASSEMENT DES SONS MUSICAUX. — THÉORIE DE LA GAMME.

302. **Classement des sons. — Intervalles musicaux.** — Les méthodes précédentes permettent de caractériser chaque son musical, de le définir en quelque sorte par le nombre de vibrations qui lui correspond dans le corps sonore. Tel son correspond

à 512 vibrations simples, tel autre à 860 vibrations simples : on reconnaît ces sons, par ce caractère numérique, à travers la diversité de timbre et d'intensité qui résulte de la diversité des corps sonores et des modes de production.

Ce caractère numérique des sons permet aussi de les comparer entre eux et de prendre le *rapport* de deux sons comme on ferait pour deux grandeurs géométriques quelconques. Le rapport de deux sons, ou plutôt des nombres de vibrations qui caractérisent ces sons, a reçu le nom particulier d'*intervalle*.

Si n et n' sont les nombres de vibrations de deux sons donnés, l'*intervalle* de ces deux sons est le rapport $\frac{n'}{n}$. On prend pour numérateur le son le plus aigu, de sorte que n' est toujours *plus grand que* n, et que l'intervalle est toujours un nombre fractionnaire plus grand que l'unité.

Comme la fraction $\frac{n'}{n}$ ne change pas de valeur lorsqu'on en multiplie ou qu'on en divise les deux termes par un même nombre, on voit que l'intervalle de deux sons ne dépend pas *de leurs nombres absolus* de vibrations, mais *du rapport* de ces nombres.

Intervalles musicaux. — Les intervalles de deux sons pouvant être quelconques, ils sont en nombre indéfini. Certains intervalles ont une importance spéciale, parce qu'ils sont exclusivement employés en musique, et on les nomme à cause de cela *intervalles musicaux*. Ce sont :

1°	l'*unisson*	$= \frac{1}{1}$.	5°	la *quinte*	$= \frac{3}{2}$.
2°	la *seconde*	$= \frac{9}{8}$.	6°	la *sixte*	$= \frac{5}{3}$.
3°	la *tierce*	$= \frac{5}{4}$.	7°	la *septième*	$= \frac{15}{8}$.
4°	la *quarte*	$= \frac{4}{3}$.	8°	l'*octave*	$= \frac{2}{1}$.

Ce sont là les *intervalles principaux*. On emploie encore en musique d'autres intervalles complémentaires, dérivés des précédents. Ce sont :

9°	la *seconde mineure*	$= \frac{16}{15}$.	10°	la *tierce mineure*	$= \frac{6}{5}$.
	la *seconde majeure*	$= \frac{10}{9}$.		la *tierce majeure*	$= \frac{5}{4}$.

Toutes les fois que deux nombres de vibrations sont entre eux *comme 2 est à 1* ou comme 3 est à 2, ou comme 4 est à 3, on *dit, du son le plus* aigu, qu'il donne l'octave, la quinte ou la *quarte de l'autre son* ; et réciproquement, si l'on dit de deux sons

qu'ils forment une quarte, une tierce majeure..., cela signifie que leurs nombres de vibrations sont entre eux comme 4 est à 3, ou comme 5 est à 3, et ainsi de suite.

303. Accords : accords consonants et dissonants. — Accords parfaits. — Lorsqu'on produit simultanément deux ou plusieurs sons, séparés par des intervalles musicaux, on produit un *accord*.

La sensation qui résulte de ce phénomène est tantôt plus ou moins agréable à l'oreille, et tantôt plus ou moins désagréable. Dans le premier cas, on dit que l'accord est *consonant*, et dans le deuxième cas, qu'il est *dissonant*.

Les accords les plus consonants sont ceux d'*octave*, de *tierce majeure* et de *quinte*. Les accords dissonants sont ceux de *quarte*, de *sixième*, de *seconde* et de *septième*.

En général, un accord est d'*autant plus* consonant que les deux termes du rapport qui le définit sont *plus petits*.

Accord parfait. — Le plus agréable de tous les accords est un accord plus complexe, formé par la production simultanée de trois sons dont les deux derniers sont séparés du premier (son fondamental) par les deux intervalles de *tierce majeure* et de *quinte*. Les nombres de vibrations successifs, en prenant le premier pour unité, sont donc représentés par les nombres fractionnaires

$$1, \quad \frac{5}{4}, \quad \frac{3}{2},$$

ou bien, en chassant les dénominateurs, par les nombres entiers

$$4, \quad 5, \quad 6.$$

C'est ce qu'on appelle l'*accord parfait majeur*, par opposition à un autre accord analogue, qu'on obtient en substituant une tierce mineure à la tierce majeure qui forme le premier intervalle. L'*accord parfait mineur* est donc caractérisé par les nombres fractionnaires

$$1, \quad \frac{6}{5}, \quad \frac{3}{2},$$

ou bien par les nombres entiers

$$10, \quad 12, \quad 15.$$

304. Harmoniques. — On nomme *sons harmoniques*, ou simplement *harmoniques*, des sons dont les nombres de vibrations sont entre eux comme la suite naturelle des nombres entiers 1, 2, 3, 4, 5, 6....

La superposition de deux de ces sons donne un accord d'autant

plus consonant, qu'on les prend plus bas dans la série. En effet, le deuxième harmonique est l'octave du premier; le troisième (qui revient à $\frac{3}{2} \times 2$) en est la double quinte; le quatrième (qui peut s'écrire 2×2) en est la double octave; le cinquième (qui équivant à $\frac{5}{4} \times 4$) en est la quadruple tierce. De plus, les deux premiers harmoniques donnent l'octave; le second et le troisième, la quinte; le troisième et le quatrième, la quarte; le quatrième et le cinquième, la tierce. Les harmoniques (du moins les premiers de la série) ne donnent donc que des accords : de là vient leur nom.

305. **Échelle musicale. — Gamme.** — On nomme *échelle musicale* une série de sons, employés en musique, séparés les uns des autres par des intervalles musicaux.

Ces sons se reproduisent périodiquement dans le même ordre, par séries de sept : chaque série s'appelle une *gamme*[1], et les sept sons ou *notes* de chaque gamme ont reçu les noms de *ut, ré, mi, fa, sol, la, si*[2].

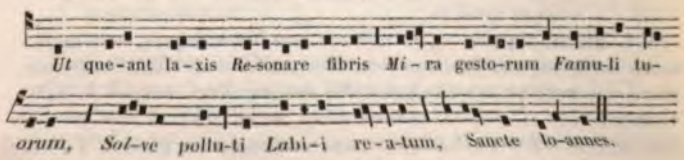
En comparant entre eux les nombres de vibrations des sept notes de la gamme, et en représentant par 1 celui du son le plus grave, l'*ut* fondamental, on trouve que les autres sont :

[A]	Notes.	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*
	Nombres relatifs de vibrations. .	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$

Dans les gammes successives qui constituent l'échelle musi-

1. D'après M. Helmholtz, le système des gammes, des modes et de leur enchaînement harmonique ne repose pas sur des lois naturelles invariables, mais il est, au contraire, la conséquence de principes esthétiques qui ont varié avec le développement progressif de l'humanité, et qui varieront encore.

2. En Angleterre et en Allemagne, les sept notes sont représentées par les lettres C, D, E, F, G, A, B. Ce mode de notation fut usité chez les anciens, et pendant le moyen âge jusqu'au XIe siècle. Un moine bénédictin, Guy d'Arezzo, remania alors l'échelle musicale, et prit pour noms des six premières notes les premières syllabes de six mots appartenant à l'hymne latine qu'on chantait dans les églises en l'honneur de saint Jean. La septième note, le *si*, ne fut ajoutée aux premières que plus tard, en 1784, par le musicien français Lemaire. Quant à la note *do*, elle s'est peu à peu substituée, pour l'usage du solfège, à la note *ut*, qui manque de sonorité. Voici le fragment d'hymne (notée en plain-chant) à laquelle on a emprunté les noms des notes de la gamme :



cale, les notes sont toutes des multiples, par les puissances croissantes de 2, des notes de même nom de la gamme fondamentale.

306. Intervalles successifs des notes : Tons et demi-tons. — Les fractions du tableau [A] représentent également les intervalles respectifs des six dernières notes par rapport à la première. Et si l'on cherche en outre les intervalles successifs entre ces notes, on trouve :

[B]	Notes.	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*
	Nombres relatifs de vibrations.	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
	Intervalles successifs		$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$.

Il n'y a donc que *trois* intervalles successifs *distincts* entre les sept notes de la gamme, à savoir $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$ et $\frac{16}{15}$. Le premier, qui est le plus grand, a été appelé *ton majeur*; le second, *ton mineur*, et le troisième, qui est le plus petit, *demi-ton majeur*. On peut donc dire que les intervalles successifs de la gamme comprennent *deux tons*, *un demi-ton*, *trois tons* et *un demi-ton*.

L'intervalle du ton majeur au ton mineur est $\frac{81}{80}$: on l'appelle *comma*. C'est le plus petit intervalle que l'on considère en musique ; il faut une oreille tellement exercée pour l'apprécier, qu'on a l'habitude de le négliger dans la pratique. C'est pourquoi l'on donne le nom commun de *ton* au deux intervalles $\frac{9}{8}$ et $\frac{10}{9}$ qui ne diffèrent entre eux que d'un *comma*.

307. Gamme naturelle. — Transposition musicale. — Dièses et bémols. — Cette gamme qui commence par la note *ut*, et qu'on appelle pour cela *gamme d'ut*, est la gamme *fondamentale* de l'échelle musicale : on l'appelle aussi *gamme naturelle* (nous verrons ci-dessous pourquoi).

La note *ut* en est dite la *note fondamentale*. On l'appelle encore la *tonique*, parce qu'elle donne le *ton* de la gamme : on dit, en effet, d'un morceau de musique qui est écrit avec les notes de cette gamme naturelle (ou de ses octaves aiguës ou graves), qu'il est *dans le ton d'ut majeur*[1]. La cinquième note, le *sol*, s'appelle la *dominante*, et la septième note, le *si*, est la *note sensible*.

Cette gamme naturelle étant insuffisante pour les besoins de la composition musicale, on a créé d'autres gammes majeures ayant pour toniques les différentes notes de la gamme fondamentale.

Dièses. — Essayons, par exemple, de créer une nouvelle gamme

1. Il est fâcheux qu'il n'y ait *que ce seul mot de ton* pour désigner les deux choses *très différentes que nous avons définies* ci-dessus.

majeure, ayant pour tonique la quinte de la gamme fondamentale, c'est-à-dire le *sol*. Les notes seront :

sol la si ut ré mi fa sol.

Cette série de huit notes ne reproduira *la mélodie connue sous le nom de gamme* qu'autant que les intervalles successifs des huit notes seront identiques à ceux de la gamme naturelle. Or ceux de la gamme naturelle sont

ton	ton	demi-ton	ton	ton	ton	demi-ton
ut – *ré*	*ré* – *mi*	*mi* – *fa*	*fa* – *sol*	*sol* – *la*	*la* – *si*	*si* – *ut*

et ceux de la nouvelle gamme

ton	ton	demi-ton	ton	ton	demi-ton	ton
sol – *la*	*la* – *si*	*si* – *ut*	*ut* – *ré*	*ré* – *mi*	*mi* – *fa*	*fa* – *sol*

Donc, dans cette dernière, le premier demi-ton est bien placé, c'est-à-dire entre la troisième et la quatrième note; mais le deuxième demi-ton est mal placé, puisqu'il est entre la sixième et la septième note, au lieu d'être entre la septième et la huitième. Pour reconstituer la mélodie, il suffira donc de *transposer* ce deuxième demi-ton. On y arrive en *diésant*, comme on dit, la septième note, le *fa*. Le procédé consiste à substituer au *fa* primitif, dit *fa naturel*, une nouvelle note, dite *fa dièse* (qu'on écrit *fa* ♯), qui est séparée du *fa* naturel par l'intervalle $\frac{25}{24}$. On établit ainsi, entre cette nouvelle note et le *mi* précédent, l'intervalle d'un *ton*, et entre le *sol* et cette nouvelle note l'intervalle d'un *demi-ton*. Alors la nouvelle série

[2] *sol la si ut ré mi fa* ♯ *sol,*

constitue une gamme majeure *en ton de sol* (*avec un dièse*) identique à la gamme naturelle *en ton d'ut*.

On obtiendra de même six autres gammes majeures, en appliquant cette règle de *transposition* successivement à toutes les notes de la gamme naturelle, de quinte en quinte. On peut l'énoncer ainsi :

Pour passer d'une gamme majeure quelconque à une autre *gamme majeure, ayant pour tonique la dominante de la première, il suffit de prendre* successivement toutes les notes de celle-ci, *mais en diésant la sous-dominante.*

Bémols. — Il y a une autre manière de transposer. Cherchons à former une nouvelle gamme, en prenant cette fois pour tonique la *sous-dominante fa* de la gamme naturelle.

La série des notes et des intervalles sera

ton	ton	ton	demi-ton	ton	ton	demi-ton
fa	*sol*	*la*	*si*	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*

Ici, c'est le dernier demi-ton qui reste en place, tandis que le premier est déplacé : il est reculé d'un rang vers la droite. Pour le ramener à sa place normale, c'est-à-dire entre la troisième et la quatrième note, on *bémolise* le *si* : procédé qui consiste à substituer au *si* primitif, dit *si naturel*, une nouvelle note, dite *si bémol* (on l'écrit *si*♭), qui est séparée : 1° du *si* naturel par l'intervalle $\frac{24}{25}$, 2° du *la* précédent par un *demi-ton*, et 3° de l'*ut* suivant par un *ton*. On a alors la nouvelle série

[2 *bis*] *fa sol la si*♭ *ut ré mi fa*,

qui constitue une nouvelle gamme majeure (dite *en fa majeur, avec un bémol à la clef*), identique à la gamme naturelle en *ut majeur*.

On créera de même six autres gammes majeures en appliquant successivement de quarte en quarte, à toutes les notes de la gamme naturelle, cette deuxième règle de transposition. On peut la formuler de la manière suivante :

Pour passer d'une gamme majeure quelconque à une autre gamme majeure, *ayant pour tonique la sous-dominante de la première*, il suffit de prendre toutes les notes de celle-ci, *mais en bémolisant la note sensible*.

308. Gammes mineures. — Tons relatifs. — Chacune des gammes précédentes est caractérisée par un *accord parfait majeur*, formé par la superposition de la tonique, de la tierce et de la quinte de la gamme. Pour la gamme d'*ut majeur*, c'est l'accord parfait fondamental *ut-mi-sol*; pour la gamme de *sol majeur*, c'est l'accord *sol-si-ré*$_1$, et ainsi de suite[1].

A chaque gamme majeure correspond une gamme mineure, caractérisée par l'*accord parfait mineur*. Ainsi, l'accord parfait mineur correspondant à l'accord parfait majeur fondamental étant *la-ut*$_1$*-mi*$_1$, la gamme mineure correspondante à la gamme d'*ut majeur* a pour tonique le *la* de celle-ci. Elle est caractérisée par la place du premier demi-ton, qui est entre la deuxième et la troisième note, c'est-à-dire entre le *si* et l'*ut*. Quant au deuxième demi-ton, il reste placé entre la septième et la huitième note, ce qui

1. Nous marquons ce *ré* d'un *indice* ($_1$) *pour indiquer* qu'il n'appartient plus à la *gamme fondamentale, mais à la gamme suivante.*

exige que la sixième et la septième note soient *diésées*. On a donc la gamme suivante :

$$la \quad si \quad ut_1 \quad ré_1 \quad mi_1 \quad fa_1\sharp \quad sol_1\sharp \quad la_1.$$

Elle est caractérisée par l'accord parfait la-ut_1-mi_1, qui est mineur, et l'on dit que ce ton de *la mineur* est *relatif* du ton d'*ut majeur*.

Le ton mineur *relatif de chacune des gammes majeures* précédentes se déterminera en leur appliquant successivement la même règle.

Remarque. — Les gammes mineures présentent toutes ce caractère particulier, que la *gamme descendante* n'est pas identique à la *gamme ascendante*, comme cela a lieu pour les gammes majeures. Ainsi, pour le ton de *la mineur*, tandis que la gamme ascendante est celle que nous avons définie plus haut,

$$la \quad si \quad ut_1 \quad ré_1 \quad mi_1 \quad fa_1\sharp \quad sol_1\sharp \quad la_1,$$

la gamme descendante est

$$la_1 \quad sol_1 \quad fa_1 \quad mi_1 \quad ré_1 \quad ut_1 \quad si \quad la,$$

c'est-à-dire que la sixième et la septième note ne sont plus diésées, et que toutes les notes redeviennent identiques à celles du ton majeur relatif[1].

309. Gamme tempérée. — Tempérament. — Entre une note quelconque *diésée* et la note suivante *bémolisée*, l'intervalle est extrêmement petit, mais il n'est pas nul. On peut s'en convaincre en calculant, par exemple, les nombres de vibrations d'un *ré* ♯ et d'un *mi* ♭. On a

$$ré\sharp = \frac{9}{8} \times \frac{25}{24} \qquad \text{et} \qquad mi\flat = \frac{5}{4} \times \frac{24}{25},$$

d'où

$$\frac{mi\flat}{ré\sharp} = \frac{2^7}{5^3} \times \frac{128}{125}.$$

Il est facile de vérifier que cet intervalle est *plus grand* que le comma : il n'est donc pas négligeable. Une octave complète se compose donc, en réalité, des sept notes naturelles, *plus* des sept dièses, *plus* des sept bémols : en tout *vingt et une* notes.

Il est possible, au moins théoriquement, d'exécuter tous ces degrés successifs avec des instruments à son variable, tels que le violon, la basse; mais, pour les instruments à sons fixes, tels que le piano et la harpe, la réalisation d'une octave complète ne serait pas pratique, à cause du nombre excessif de *touches* ou de *cordes* qu'il faudrait attribuer à l'instrument. On est donc convenu de confondre la note diésée avec la note bémolisée suivante, de manière à constituer une gamme complète mixte, avec douze degrés ou intervalles successifs, également espacés.

1. Lorsqu'on veut marquer avec plus de précision ce retour des notes *fa*♯ et *sol*♯ à leurs valeurs naturelles, on les affecte d'un signe particulier ♮, appelé en musique *bécarre*. La gamme descendante s'écrit alors

$$la_1 \quad sol_1\natural \quad fa_1\natural \quad mi_1 \quad ré_1 \quad ut_1 \quad si \quad la.$$

Cette forme de la gamme mineure descendante tend à tomber en désuétude. *On préfère maintenant* descendre la gamme mineure exactement comme *on la monte, et écrire*

$$la_1 \quad sol_1\sharp \quad fa_1\sharp \quad mi_1 \quad ré_1 \quad ut_1 \quad si \quad la.$$

La gamme, ainsi établie, s'appelle *gamme tempérée*. L'intervalle constitutif de cette gamme s'appelle *tempérament* ou *demi-ton moyen*. Puisqu'il y en a douze, entre l'*ut* fondamental et l'*ut* suivant, on voit que ce tempérament est égal à $\sqrt[12]{2}$ (= 1,059). Il diffère légèrement du demi-ton majeur (1,066).

Voici la série des notes de la gamme tempérée, avec les intervalles correspondants :

ut	= 1	*fa* ♯ ou *sol* ♭	= 1,409
ut ♯ ou *ré* ♭	= 1,059	*sol*	= 1,495
ré	= 1,121	*sol* ♯ ou *la* ♭	= 1,584
ré ♯ ou *mi* ♭	= 1,187	*la*	= 1,678
mi	= 1,257	*la* ♯ ou *si* ♭	= 1,780
fa	= 1,331	*si*	= 1,888

Enfin l'*ut* suivant est 2, de manière que l'intervalle d'octave est rigoureusement conservé; celui de tierce $\left(\frac{3}{4} = 1,250\right)$ et celui de quinte $\left(\frac{3}{2} = 1.500\right)$ n'éprouvent que des altérations négligeables.

310. Diapason. — Le *diapason* est un petit instrument à l'aide duquel on reproduit à volonté une note invariable : on s'en sert pour accorder les instruments de musique. Il consiste en une verge d'acier recourbée sur elle-même en forme de pincette (fig. 300). On le fait vibrer, soit en passant un archet sur ses bords, soit en écartant brusquement ses deux branches au moyen d'un cylindre de fer qu'on passe de force entre elles, comme le montre la figure. Les deux lames ainsi écartées de leur position d'équilibre, y reviennent en vibrant, et produisent un son constant pour chaque diapason. On renforce le son par *résonance*, en fixant l'instrument sur une caisse en bois blanc, ouverte à l'une de ses extrémités.

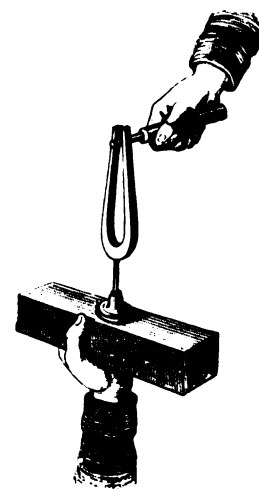


Fig. 300.

Diapason normal. — Le nombre de vibrations d'un diapason varie avec la longueur et l'épaisseur de ses deux branches. On peut donc construire des instruments rendant une note quelconque de la *gamme* : on n'a qu'à les régler à l'aide de *la sirène, ou mieux par le procédé* graphique de Duhamel. On *appelle diapason normal celui qui* rend le *la* d'une certaine

gamme qu'on distingue des autres, dans l'échelle musicale, en affectant ses diverses notes de l'indice 3 : par conséquent le diapason normal donne le la_3.

La *normal*. — Le nombre des vibrations simples du diapason normal a d'abord été de 856 par seconde; puis il a été peu à peu en s'élevant jusqu'à 880. En 1859, une Commission musicale officielle adopta un *diapason normal*, obligatoire pour tous les établissements musicaux de France, qui exécute 870 vibrations simples par seconde. Le la_3 a été défini du même coup : c'est ce qu'on appelle le *la normal*[1].

311. **Notation des diverses gammes naturelles. — Nombres absolus de vibrations.** — Le nombre absolu de vibrations qui correspond à l'*ut* fondamental étant tout à fait arbitraire, on peut admettre une série indéterminée de gammes. Comme point de départ de l'échelle musicale on a choisi le son le plus grave de la *basse*, on en a fait l'*ut* de la première gamme, dont on est convenu[2] de caractériser les notes par l'indice 1 : on désigne alors les notes des gammes plus aiguës par les indices 2, 3..., et celles des gammes plus graves par les indices — 1, — 2.... Par exemple, fa_2 est l'octave aiguë de fa_1 et fa_{-1} en est l'octave grave.

On n'a considéré jusqu'ici que les nombres de vibrations relatifs; mais il est facile de déduire tous les nombres absolus de celui qui a été adopté pour le la_3. Par exemple, le nombre de vibrations de ut_3 sera donné par l'équation

$$\frac{la_3}{ut_3} = \frac{5}{3}, \quad \text{d'où} \quad ut_3 = \frac{3}{5} \times la_3 = \frac{3}{5} \times 870 = 522 \text{ vibr. simples,}$$

et ainsi de suite pour toutes les autres notes de l'échelle musicale.

312. **Limites de l'échelle musicale.** — 1° *Limite instrumentale*. — En musique, on emploie des notes encore plus graves de deux octaves que l'ut_1 de Sauveur. On note la première octave inférieure ut_{-1}... et l'octave au-dessous, ut_{-2}.... Leurs nombres de vibrations se déduisent aisément des précédents. On a (en vibrations simples) $ut_{-1} = 65{,}25$ et $ut_{-2} = 32{,}625$. Cette limite des sons graves est donnée par le plus grand tuyau des grandes orgues.

Les pianos actuels vont du la_{-2} à l'ut_6 : leur registre comprend donc un peu moins de sept octaves. La limite des sons aigus est donnée par la petite flûte : c'est le $ré_6$.

1. Le diapason normal est déposé au Conservatoire de musique de Paris.

2. Cette convention fut proposée par le physicien Sauveur, qui prit en outre, pour point de départ de l'échelle musicale, un ut_{-2} égal à 32 vibrations simples, ce qui donnait 512 vibrations pour ut_3.

Nous avons dit précédemment (296) que, d'après M. Helmholtz, les sons d'un bon emploi en musique vont environ de 40 vibrations simples à 8000. Par conséquent l'échelle musicale proprement dite ne comprend que sept octaves[1].

2° *Limite vocale.* — L'échelle des voix humaines est encore plus restreinte. Elle va du fa_{-1}, note extrême du registre des *basses-tailles*, à l'ut_6, note extrême du registre des *soprani*.

CHAPITRE III

VIBRATIONS DES CORDES.

315. Cordes vibrantes. Définitions. — On nomme *cordes*, en acoustique, des corps filiformes, en métal ou en boyau, qui sont ***élastiques par tension***.

On provoque dans les cordes deux sortes de vibrations : les unes ***transversales***, qui se font dans une direction perpendiculaire aux cordes ; les autres *longitudinales*, qui se font dans le sens de leur longueur. On excite les premières, soit en frottant les cordes avec un archet, comme sur le violon, soit en les pinçant, comme on le fait sur la harpe et la guitare. Quant aux vibrations longitudinales, on les fait naître en frottant les cordes, dans le sens de leur longueur, avec un morceau d'étoffe saupoudré de colophane.

314. Sonomètre. — Le *sonomètre* est un appareil qui sert à étudier les vibrations transversales des cordes. On l'appelle aussi ***monocorde***, parce que souvent il ne porte qu'une seule corde.

Il se compose d'une caisse sonore en bois mince, destinée à renforcer le son. Sur cette caisse sont deux chevalets fixes A et B (fig. 301), distants l'un de l'autre d'un mètre. D'un chevalet à l'autre s'étend une échelle divisée en millimètres, et à gauche et à droite de cette échelle sont tracées sur la caisse deux séries de divisions, marquant, l'une la gamme vraie ou *diatonique*, l'autre la gamme *tempérée*. Sur les chevalets passent deux cordes : l'une, *m*, s'enroule d'un bout sur un boulon de fer *a*, qui est fixe, et de l'autre bout sur un boulon *b*, qui est lié à une vis horizontale ; on le recule plus ou moins en faisant tourner un écrou *k*, dans

1. Le son de 75 700 vibrations simples, indiqué par Despretz comme la limite supérieure des sons perceptibles, *affecte douloureusement* l'oreille même la moins musicale.

lequel passe la vis, de manière à tendre la corde à volonté. La deuxième corde, fixée de la même manière à son extrémité *r*, passe sur une poulie par son autre extrémité. Là elle est tendue par des poids de plomb P, qu'on augmente jusqu'à ce qu'on lui ait donné la tension voulue. Enfin, un chevalet mobile C peut se déplacer sous la corde pour en faire varier la longueur.

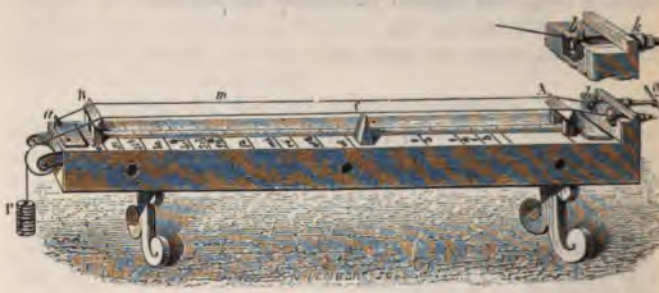


Fig. 301.

La première corde *m* rend un son constant, qui est déterminé par une tension invariable; c'est à ce son qu'on compare ensuite les sons successivement rendus par l'autre corde, à mesure qu'on en modifie la tension ou la longueur. Ou bien les deux cordes passent chacune sur une poulie, et alors elles sont tendues par des poids qui sont égaux, ou qui sont entre eux dans un rapport donné.

315. **Lois des vibrations transversales.** — 1° *Énoncé* :

1° *La tension étant constante, le nombre des vibrations qu'exécute une corde, en une seconde, est en raison inverse de sa longueur.*

2° *Toutes choses égales d'ailleurs, le nombre des vibrations est en raison inverse du rayon de la corde.*

3° *Le nombre des vibrations d'une corde est directement proportionnel à la racine carrée du poids qui la tend.*

4° *Toutes choses égales d'ailleurs, le nombre des vibrations d'une corde est inversement proportionnel à la racine carrée de sa densité.*

2° *Formule.* — Ces lois, établies expérimentalement par Mersenne, ont été ensuite théoriquement expliquées par Taylor. Il a donné la formule suivante, qui les comprend toutes :

$$[1] \qquad n = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{gP}{\pi d}},$$

dans laquelle n représente le nombre de vibrations simples par seconde, l la

ongueur de la corde, c'est-à-dire la partie vibrante comprise entre les deux chevalets A et B (fig. 501), r le rayon de la section de la corde, P le poids qui la tend, et enfin d le poids spécifique de la substance, et π le rapport de la circonférence au diamètre.

Dans cette formule, P doit être compté en kilogrammes, r et l en décimètres.

3° *Vérification. — Loi des longueurs.* — Si l'on fait vibrer la corde du sonomètre d'abord dans son entière longueur, puis en lui donnant, à l'aide du chevalet mobile, des longueurs qui soient en raison inverse [illegible] intervalles de la gamme, c'est-à-dire 1, $\frac{8}{9}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{8}{15}$ et $\frac{1}{2}$ [illegible] tient successivement toutes les notes de la gamme : ce qu[illegible] première loi.

Loi des diamètres. — O[illegible] e loi en tendant également sur le sonomètre deux c[illegible] même substance, dont les diamètres soient, par exe[illegible] 3 et 2. Or, en les faisant vibrer, la deuxième donne la q[illegible] de la première : donc elle fait 3 vibrations pendant que l[illegible] emière en fait 2.

Loi des tensions. — Aya[illegible] placé sur le sonomètre deux cordes identiques, on les tend pa[illegible] les poids qui soient entre eux comme 4 et 9. Or la deuxième donne encore la quinte de la première; d'où l'on conclut que leurs nombres de vibrations sont entre eux comme 2 est à 3, c'est-à-dire comme les racines carrées des tensions. Si les deux poids étaient entre eux comme 16 et 25, on obtiendrait la tierce majeure $\frac{5}{4}$.

Loi des densités. — On fixe sur le sonomètre deux cordes de même rayon, mais de densités différentes d et d'. Leur ayant donné la même tension, on promène sous la plus dense le chevalet mobile jusqu'à ce qu'elle soit à l'unisson avec l'autre corde. Soient alors l et l' les longueurs de ces deux cordes qui rendent la même note n, on trouve que le rapport $\frac{l}{l'}$ est égal à $\sqrt{\frac{d}{d'}}$. Or soit n' la note que rendrait la corde la plus dense si on lui donnait la même longueur l qu'à l'autre corde; il est facile de déterminer n' d'après la loi des longueurs; on doit avoir $\frac{n'}{n} = \frac{l'}{l}$: l'expérience ayant donné $\frac{l'}{l} = \sqrt{\frac{d'}{d}}$, on en conclut $\frac{n'}{n} = \sqrt{\frac{d}{d'}}$.

516. **Nœuds et lignes nodales. — Sons harmoniques des cordes.** — Lorsqu'un corps sonore vibre, non seulement il vibre dans son ensemble, mais il se divise généralement en un certain nombre de parties aliquotes, dont chacune est animée de vibrations qui lui sont propres. Entre ces portions vibrantes il existe des points ou des lignes *relativement fixes*. Ce sont ces points et ces lignes qu'on désigne sous les noms de *nœuds* et de *lignes nodales*. Les parties vibrantes comprises entre *deux lignes nodales ou deux nœuds* consécutifs se nomment conca-

mérations. Le milieu d'une concamération s'appelle un *ventre de vibration* c'est là que les vibrations atteignent leur maximum d'amplitude.

Ces cordes vibrantes présentent des exemples curieux de nœuds et de ventres quand on ne fait vibrer qu'une partie aliquote de leur longueur, c'est-à-dire un tiers, un quart, un cinquième. Pour cela, on fixe la corde à ses deux bouts et l'on fait glisser dessous un petit chevalet, en l'arrêtant successivement au tiers, au quart, au cinquième de la corde. Le chevalet étant au tiers, comme le représente la figure (302, I), on fait vibrer la portion BD avec un archet l'autre portion AB se subdivise alors spontanément en deux parties AC et CB, qui vibrent séparément, le point C demeurant sensiblement fixe. En effet, si l'on

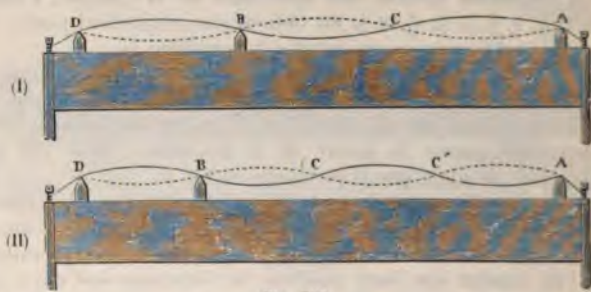


Fig. 302.

place des chevrons de papier, l'un en C, un autre entre B et C, un troisième entre C et A, celui qui est en C n'éprouve qu'un léger ébranlement, tandis que les deux autres sont projetés au loin. Il y a donc un nœud au premier point et des ventres aux deux autres. Si le chevalet B est au quart de la corde, il se produit entre A et B deux nœuds et trois ventres (fig. 302, II); s'il est au cinquième, il se forme entre les mêmes points trois nœuds et quatre ventres, et ainsi de suite.

Lorsqu'une corde un peu longue vibre dans son entier, une oreille exercée distingue, outre le son fondamental, les *harmoniques* 2, 3, 4, 5.

377. **Vibrations longitudinales des cordes.** — Les lois des vibrations longitudinales des cordes ont été trouvées par le calcul. Quelques-unes sont analogues aux lois des vibrations transversales et sont résumées par une formule analogue :

$$n = \frac{1}{2rl}\sqrt{\frac{gE}{\pi d}}.$$

Dans cette formule les coefficients n, r, l, g et d ont la même signification que dans la formule des vibrations transversales, et E représente le *coefficient d'élasticité* de la corde. On nomme ainsi le *poids par lequel il faudrait tendre la corde pour qu'elle s'allongeât d'une quantité égale à elle-même* (allongement qui ne peut jamais se réaliser, la rupture ayant lieu bien auparavant). Ce coefficient étant toujours un nombre considérable par rapport au coefficient P des variations transversales, il en résulte que, pour une même corde, les vibrations longitudinales sont beaucoup plus rapides que ses vibrations transversales : *autrement dit*, une corde qui vibre *longitudinalement* rend des sons *beaucoup plus aigus* que lorsqu'elle vibre *transversalement*.

CHAPITRE IV

VIBRATIONS DE L'AIR DANS LES TUYAUX SONORES.

518. Tuyaux sonores : Définitions. — On nomme *tuyaux sonores* des tubes à parois résistantes, dans lesquels on produit des sons en faisant vibrer la colonne d'air qui y est contenue.

Si l'on ne faisait que souffler dans les tuyaux, il n'y aurait pas de son, mais seulement un mouvement progressif continu de l'air. Pour qu'un son se produise, il faut, par un moyen quelconque, exciter dans l'air une succession rapide d'impulsions périodiques se communiquant à toute la colonne d'air. De là la nécessité de donner au tuyau sonore une *embouchure* : c'est une ouverture de forme convenable pour que l'air qu'on y insuffle n'y puisse entrer que par intermittences, et non d'une manière continue. D'après la disposition adoptée pour mettre ainsi l'air en vibration, les tuyaux sonores se divisent en deux catégories, les *tuyaux à bouche* et les *tuyaux à anche*.

Fig. 303. Fig. 304.

519. Tuyaux à bouche : Description et jeu. — Les tuyaux dits *à bouche* sont de bois ou de métal, prismatiques ou cylindriques, et toujours d'une grande longueur par rapport à leur section (fig. 303 et 304). Ils ont une embouchure dont toutes les parties sont fixes. La partie inférieure P*i*, par laquelle arrive l'air, est le *pied* ; elle sert à fixer le tuyau sur une soufflerie. A sa sortie du pied, l'air passe par une fente étroite *i*, qu'on appelle la *lumière*. En regard de celle-ci est pratiquée, dans la paroi opposée, une ouverture transversale qui est la *bouche* ; son bord *a*, taillé en biseau, est la *lèvre supérieure*, et le bord *b*, la *lèvre inférieure* : c'est l'ensemble de toutes ces pièces qui constitue l'*embouchure*.

Le courant d'air qui passe par la lumière se brise contre la lèvre supérieure,

s'y comprime, et, par un effet d'élasticité, réagit sur le courant, qui continue d'arriver et l'arrête; mais cet arrêt n'a lieu que pendant un temps très court, parce que l'air s'échappe par la bouche et que le courant venant du pied reprend aussitôt. De là des pulsations qui se transmettent à l'air dans le tuyau et y font naître une suite de demi-ondes sonores, alternativement condensées et dilatées. Ces ondes sont d'autant plus rapides que la vitesse du courant est plus grande et que la lèvre supérieure est plus rapprochée de la lumière. Pour rendre le son pur, il faut établir un certain rapport entre les dimensions des lèvres, l'ouverture de la bouche et la grandeur de la lumière; en outre, le tuyau doit avoir une grande longueur par rapport à sa section.

Dans la *flûte traversière*, l'embouchure consiste en une simple ouverture latérale circulaire. C'est par la disposition qu'on donne aux lèvres que le courant d'air vient se briser contre les bords de cette ouverture. Il en est de même pour la *flûte de Pan* et pour une clef forée avec laquelle on siffle.

La figure 304 représente l'embouchure d'un tuyau cylindrique fort en usage dans les jeux d'orgue. Les mêmes lettres indiquent les mêmes pièces que dans la figure 303.

320. **Tuyaux à anche : Description et jeu.** — Dans ces tuyaux, la colonne d'air est mise en vibration à l'aide d'une pièce élastique spéciale qu'on nomme *anche*. Il y a deux espèces d'anches, l'*anche battante* et l'*anche libre*.

Anche battante. — Elle se compose d'une pièce de bois ou de métal *a* (fig. 305) qu'on nomme la *rigole*, creusée en forme de cuiller dans le sens de sa longueur. Elle est fixée à une espèce de bouchon K percé d'un trou qui fait communiquer la cavité de la rigole avec un long tuyau T. La rigole est recouverte d'une lame de laiton *l*, mince et flexible, qu'on nomme la *languette*. Celle-ci, dans sa position ordinaire, est légèrement écartée des bords de la rigole; mais elle peut s'en rapprocher facilement et la fermer. Enfin, un fil de fer *br*, qu'on désigne sous le nom de *rasette*, s'applique par sa partie inférieure, qui est recourbée, sur la languette, de manière à en régler l'écartement et à en raccourcir ou en allonger plus ou moins la partie vibrante, ce qui permet d'augmenter ou de diminuer le nombre de ses vibrations.

Fig. 305.

Fig. 306.

L'anche peut être adaptée en haut d'un tuyau rectangulaire ou *porte-vent*, fixé sur le sommier d'une soufflerie. Lorsqu'on fait arriver l'air dans le porte-vent, il passe d'abord entre la languette et la rigole pour s'échapper par le tuyau T; puis, la vitesse du courant s'accélérant, la languette vient frapper les bords de la rigole, la ferme et empêche le courant de passer; puis, la languette revient sur elle-même, est entraînée de nouveau aussitôt que le courant passe, et ainsi de suite : il en résulte un son d'autant plus aigu que le courant d'air est plus vif et les vibrations de la languette plus nombreuses.

Anche libre. — Grenié, en 1810, a inventé une espèce d'anche qu'on nomme *anche libre*, parce que la languette entre dans la rigole en rasant ses bords de

manière à osciller *librement* du dedans au dehors. La rigole consiste ici en une petite caisse de bois *a* (fig. 306), dont la paroi antérieure est une plaque de laiton. Au milieu de celle-ci est une ouverture longitudinale dans l'intérieur de laquelle est la languette *l*, qui peut s'infléchir librement en avant et en arrière pour livrer passage au courant d'air, qu'elle arrête chaque fois qu'elle rase les bords de la fente. Une rasette *r* sert encore à régler la longueur de la partie vibrante de la languette.

321. Lois expérimentales des tuyaux sonores. — Les lois qui déterminent les sons rendus par les tuyaux sonores ont été successivement découvertes par le P. Mersenne et par Daniel Bernoulli. Elles s'appliquent exclusivement aux tuyaux très étroits.

Loi du P. Mersenne (*Loi des tuyaux semblables*). — *Deux tuyaux semblables rendent des sons dont les nombres de vibrations sont en raison inverse des dimensions homologues*

Par exemple, si l'on fait parler successivement deux tuyaux semblables (fig. 307) dont les dimensions homologues sont dans

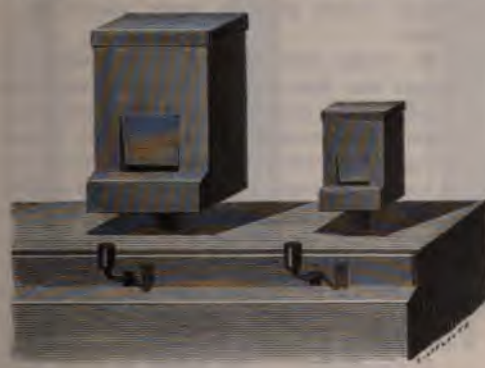


Fig. 307.

le rapport $\frac{1}{2}$, le plus petit rendra un son à l'octave aiguë du son rendu par le plus grand.

Lois de Bernoulli. — I. Cas des tuyaux ouverts. — 1° *Loi des harmoniques. — Un même tuyau ouvert peut rendre une suite de sons harmoniques dont les nombres de vibrations sont entre eux comme la série des nombres naturels.*

Cela veut dire que, si l'on représente par 1 le son fondamental, les sons qui viennent après lui sont successivement 2, 3, 4, 5, 6, 7... : c'est la série complète des harmoniques du son fondamental.

2° *Loi des longueurs. — Pour des tuyaux semblables, mais inégaux, les nombres des vibrations des harmoniques de même ordre sont en raison inverse des longueurs.*

Cette loi n'est évidemment qu'un cas particulier de celle du P. Mersenne.

II. Cas des tuyaux fermés. — 1° *Loi des harmoniques. — Un même tuyau fermé peut rendre une suite de sons harmoniques dont les nombres de vibrations varient comme la série des nombres impairs.*

Cela veut dire que, si l'on représente par 1 le nombre des vibrations du son fondamental, ceux des autres sons rendus seront représentés par 3, 5, 7.... C'est uniquement la série des harmoniques d'ordre impair, et quelque effort qu'on fasse, on ne peut tirer du tuyau les autres harmoniques.

Fig. 308.

2° *Loi des longueurs. — Le son fondamental rendu par un tuyau fermé est le même que le son fondamental rendu par un tuyau ouvert de longueur double.*

On vérifie cette dernière loi au moyen d'un tuyau ouvert aux deux bouts, muni en son milieu d'un diaphragme à coulisse, percé d'une ouverture carrée égale à la section du tuyau (fig. 308). Quand le diaphragme est enfoncé, le tuyau est ouvert dans toute sa longueur; mais il est fermé en son milieu lorsque le diaphragme est dans la position représentée par le dessin. Dans ce cas, on a le son fondamental d'un tuyau fermé de longueur VN. Puis, lorsque le diaphragme est rentré, on a le son fondamental d'un tuyau ouvert de longueur double VV'. Or, dans les deux cas, le son est le même.

3° *Corollaires.* — On déduit de cette dernière loi les corollaires suivants, qui auraient pu lui servir d'énoncé :

I. *Le son fondamental* d'un tuyau fermé est à *l'octave grave* d'un tuyau ouvert *de même longueur.*

II. *Pour un harmonique de même rang,* le nombre des vibrations d'un tuyau fermé est *moitié* de celui d'un *tuyau ouvert de même longueur.*

322. **Nœuds et ventres de vibration.** — L'expérience prouve que, lorsqu'un tuyau *parle*, il existe dans la colonne d'air vibrante, de distance en distance, des tranches fixes qui sont des *nœuds*, et qu'entre deux nœuds consécutifs il se rencontre toujours une *section où le mouvement* vibratoire de l'air atteint un maximum :

c'est un *ventre*. De plus, le caractère *expérimental* des nœuds, c'est que l'air y subit des *variations continuelles de pression et de densité*, tandis que le caractère des ventres, c'est que l'air y vibre constamment *sans changer* de pression ni de densité.

Démonstration expérimentale. — Plusieurs expériences servent à constater l'existence des nœuds et des ventres de vibration dans les tuyaux sonores, ainsi qu'à en déterminer le caractère mécanique.

1° On colle une membrane de baudruche sur un anneau de carton supporté par trois fils comme un plateau de balance; puis, ayant répandu du sable sur la baudruche, on descend le tout lentement dans

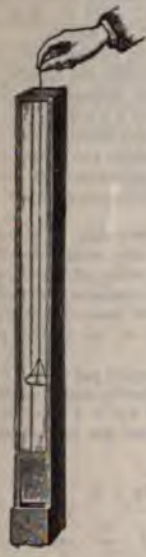


Fig. 309.

Fig. 310.

Fig. 311.

un tuyau pendant qu'il parle (fig. 309). Or, de distance en distance, on observe que les grains de sable restent inertes sur la baudruche : c'est là que sont les nœuds; tandis que, dans les positions intermédiaires, les grains de sable sont projetés plus ou moins vivement par les vibrations que la membrane reçoit de l'air.

2° On perce dans les parois d'un tuyau sonore des trous qu'on peut ouvrir ou fermer à volonté à l'aide d'obturateurs mobiles sur deux tourillons (fig. 310). La densité de l'air étant la même qu'à l'extérieur dans les parties correspondantes aux ventres, lorsqu'on ouvre un trou en regard de ceux-ci, le son n'éprouve aucune modification. Au contraire, en regard des nœuds, où la densité de l'air est variable, dès qu'un trou est ouvert, le son est complètement changé : car alors la tranche d'air intérieure, se mettant à la pression atmosphérique, *prend une densité constante, et, par suite*, il se forme un ventre là *où il y avait un nœud.*

3° *Flammes manométriques. — Expériences de Kœnig.* — Sur l'une des parois d'un tuyau rectangulaire est une chambre P, dans laquelle arrive du gaz d'éclairage par un tuyau de caoutchouc S (fig. 311). De cette chambre partent trois tubes de caoutchouc *a*, *a*, *a*, qui conduisent le gaz à autant de capsules fixées dans la paroi antérieure du tuyau, et sur chacune desquelles est appliqué un bec de gaz. Les trois becs étant allumés, si l'on fait rendre d'abord au tuyau le son fondamental, les deux becs A et C brûlent avec calme, tandis que le bec B s'éteint; or en B il y a un nœud et ce sont les variations continuelles de pression et de densité dont il est le siège qui font vibrer la membrane de la capsule B et éteignent le bec en le soufflant[1].

Si l'on recommence l'expérience en accélérant le courant d'air, de manière à obtenir le son 2, ce n'est plus le bec B qui s'éteint, mais les deux becs A et C. Cela veut dire qu'en B il y a un ventre, et en A et C des nœuds.

Remarque générale. — Dans toutes ces expériences, on constate que, dans un même tuyau, ouvert ou fermé, quel que soit le nombre des nœuds, ils sont toujours également distants entre eux pour un même harmonique rendu et qu'au milieu de la distance de deux nœuds consécutifs il y a toujours un ventre.

325. **Formules des tuyaux sonores.** — La disposition des nœuds et des ventres, dans les tuyaux qui parlent peut être établie par l'expérience, et l'on peut en déduire, non seulement l'explication des lois expérimentales des tuyaux, mais encore des formules générales qui les comprennent toutes.

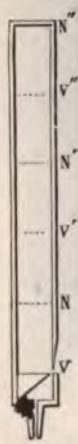


Fig. 312.

On montre que la colonne d'air qui vibre dans un tuyau fermé est toujours partagée par des nœuds et des ventres de vibration en un nombre *impair* de parties égales entre elles qu'on appelle quelquefois *concamérations* (fig. 312). La concamération est égale au quart de la longueur d'onde complète. Dans un tuyau ouvert, la colonne d'air vibrante se subdivise en un nombre *pair* de concamérations.

Si donc on représente la longueur du tuyau par L, par λ la longueur de l'onde complète, et par p un nombre entier quelconque, en sorte que $2p$ soit un nombre pair et $2p + 1$ un nombre impair, on peut traduire les faits précédents par les relations suivantes :

[1] pour les tuyaux fermés, $L = (2p + 1)\frac{\lambda}{4}$,

[2] et pour les tuyaux ouverts, $L = 2p \cdot \frac{\lambda}{4}$, ou $L = p \cdot \frac{\lambda}{2}$.

On a vu que la longueur d'onde λ est liée à la durée de la vibration T et à la vitesse du son (dans le gaz qui vibre) par l'équation de définition $\lambda = VT$. En appelant n le nombre de vibrations par seconde qui caractérise le son, on a évidemment

$$n = \frac{1}{T}, \quad \text{d'où} \quad T = \frac{1}{n} \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{V}{n}.$$

En remplaçant, dans les formules [1] et [2], λ par sa valeur $\frac{V}{n}$, il vient

$$L = (2p + 1)\frac{V}{4n} \quad \text{et} \quad L = p\frac{V}{2n}.$$

1. *C'est à cause des variations de pression que ces flammes subissent dans l'appareil de Kœnig, qu'on les appelle flammes manométriques.*

D'où l'on déduit les relations définitives :

[1 *bis*] pour les tuyaux fermés, $n = \frac{(2p+1)V}{4L}$,

[2 *bis*] pour les tuyaux ouverts, $n = \frac{pV}{2L}$.

Il serait facile de déduire de ces deux formules toutes les lois de Mersenne et de Bernoulli, énoncées précédemment.

Remarque. — Reste à expliquer la production des ventres et des nœuds de vibration. On ne peut le faire rigoureusement qu'en faisant intervenir le *principe des interférences*. C'est de ce principe qu'on peut déduire une théorie complète des tuyaux sonores.

524. Principe des interférences. — Reprenons l'expérience simple exposée précédemment (278). Supposons que, au lieu de faire tomber une seule pierre en un point d'une nappe d'eau tranquille, nous en fassions tomber deux, en deux points peu éloignés. Chacune d'elles donnera naissance à un système d'ondes circu-

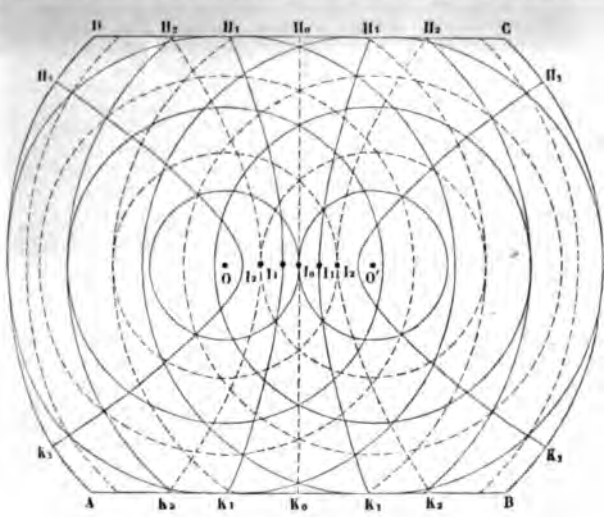


Fig. 513.

laires, qui se propagera séparément à la surface de l'eau ; et ces deux systèmes d'ondes se rencontreront nécessairement et se combineront sur leur parcours. Chaque point de croisement recevra simultanément deux mouvements : s'ils sont de même sens, *ils s'ajoutent*, et s'ils sont de sens contraire, *ils se retranchent*.

Dans le cas particulier où les deux pierres sont tombées, en O et O' (fig. 513), en même temps *et de la même hauteur*, c'est-à-dire où les deux mouvements *vibratoires ont commencé au même instant* et avec la même amplitude, le *point I_0, qui est au milieu de la distance* des centres, reçoit toujours de chacun

d'eux des mouvements de même sens, et son mouvement vibratoire *sera maximum*; il en sera de même de tous les points de la perpendiculaire $H_0 I_0 K_0$, élevée sur le milieu de la ligne des centres. Mais, à droite et à gauche de cette ligne centrale, on trouvera d'autres points qui seront plus éloignés de l'un des centres de vibration que de l'autre : si la différence de ces distances ou, comme on dit, la *différence de marche*, est *d'un nombre impair* de demi-longueurs d'onde, le mouvement y sera détruit, parce que les ondes circulaires s'y rencontreront toujours avec des vitesses égales et contraires : *l'eau y restera donc en repos*; si la *différence de marche* est *d'un nombre pair* de demi-longueurs d'onde, les ondes circulaires s'y rencontreront, comme sur la ligne centrale, avec des vitesses égales et de même sens, et leurs mouvements s'ajouteront : l'eau y prendra *un mouvement maximum*. Tous les points des deux courbes $H_1 I_1 K_1$, situés de part et d'autre de la ligne centrale, sont dans le premier cas : ils restent perpétuellement en repos, au milieu de l'agitation qui les environne; tous les points des deux courbes $H_2 I_2 K_2$ sont perpétuellement en état d'agitation maximum, comme ceux de la ligne centrale $H_0 I_0 K_0$.

Franges. — Ces lignes, et les autres lignes analogues, obtenues par les intersections successives des différentes ondes circulaires, sont appelées des *franges*. Les cercles noirs de la figure 313 représentent les ondes renflées, et les cercles ponctués représentent les ondes déprimées. Partout où deux cercles de même espèce se coupent, il y a maximum de mouvement : le lieu des points où ce maximum a lieu constitue les *franges de mouvement*; elles sont représentées par des lignes ponctuées $H_0 K_0$, $H_2 K_2$.... Partout où deux cercles d'espèce contraire se coupent, il y a destruction de mouvement : le lieu des points où cette destruction a lieu constitue les *franges de repos*; elles sont représentées par des lignes pleines $H_1 K_1$, $H_3 K_3$. On démontre que les unes et les autres sont des *hyperboles* ayant pour foyers communs les deux centres d'ébranlement O et O' et pour axes la ligne OO', puis la frange centrale $H_0 K_0$.

Partout où il y a addition de mouvement ou soustraction de mouvement, on dit en général qu'il y a *interférence* de mouvements. Cette expression s'applique plus particulièrement au cas où, par suite de la soustraction des mouvements, il y a *destruction complète* du mouvement ou repos absolu, et le *principe des interférences* consiste en cette proposition curieuse, — conséquence directe de l'analyse précédente, — c'est que *du mouvement ajouté à du mouvement produit du repos*.

325. **Application du principe des interférences aux ondes sonores.** — Pour les ondes sonores aériennes, les mêmes phénomènes se reproduisent dans l'espace, au lieu d'être confinés dans un plan. Deux corps sonores, mis en vibration au même instant, avec la même intensité et avec la même vitesse (c'est-à-dire *à l'unisson*), donnent naissance à deux systèmes d'ondes sphériques, qui se propagent dans l'air de la même manière que les ondes planes liquides se propagent à la surface de l'eau. Elles sont alternativement condensées et dilatées, de telle sorte que, si l'on représente graphiquement l'état vibratoire de l'air à un instant donné, sur un rayon Ox émané de l'un des centres de vibration, on aura la courbe sinueuse *aaaa* de la figure 314, I. Au bout d'un temps $\frac{T}{2}$, égal à la durée d'une vibration simple, l'état vibratoire sur le même rayon sera exactement inverse : il est figuré par la ligne ponctuée *bbbb* de la figure 314, II. Il en sera de même pour les ondes aériennes émanées de l'autre centre de vibration. Ces ondes aériennes *interféreront* nécessairement de la même manière que les ondes aqueuses. Partout où deux ondes condensées ou deux ondes dilatées *se rencontreront*, il y aura maximum de mouvement : ainsi les mouvements *concordants aaa* (fig. 314, I) et *a'a'a'* (fig. 314, II) donneront le mouvement *résultant maximum AAAA* (fig. 314, IV). Partout où deux ondes d'espèce contraire *se rencontreront*, il y aura, au contraire, destruction de mouvement :

ainsi les mouvements discordants *aaa* (fig. 314, I) et *bbb* (fig. 314, II) donneront le mouvement nul, figuré par la droite Ox (fig. 314, IV)[1]. On pourra donc énoncer cette curieuse proposition, qui constitue l'application du principe des interférences aux ondes sonores, que *du son ajouté à du son produit du silence.*

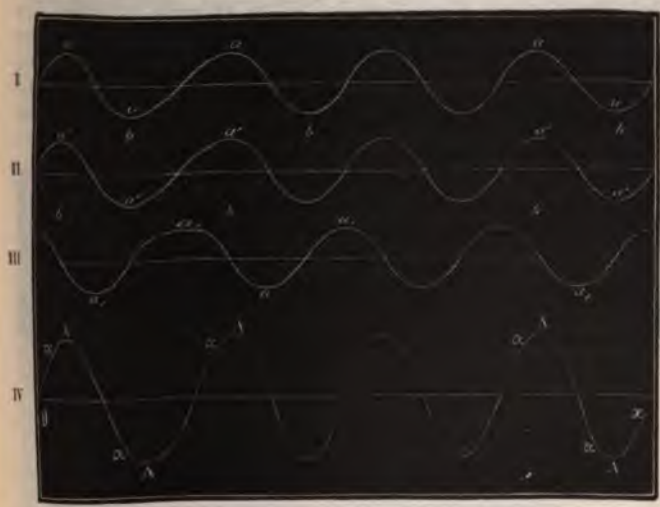


Fig. 314.

Le lieu de l'espace où le mouvement, et par suite le son, est détruit, constitue la *frange silencieuse*; le lieu où le mouvement, et par suite le son, est renforcé, constitue la *frange sonore*. Ici les franges ne sont plus des lignes. La frange centrale est un *plan perpendiculaire* à la ligne des centres sonores, et les franges latérales sont des *hyperboloïdes de révolution*, ayant pour courbes méridiennes des hyperboles analogues à celles qui sont représentées dans la figure 313.

526. Théorie des tuyaux sonores. — On a pu vérifier expérimentalement le principe des interférences sonores à l'aide de quelques expériences de cours[2]; mais la véritable vérification du principe résulte de la théorie des tuyaux sonores et de l'explication des *battements*.

Existence des nœuds et des ventres de vibration. — Deux espèces

1. La courbe $\alpha\alpha\alpha\alpha$ (fig. 314, IV) représente un cas intermédiaire d'interférence : c'est le mouvement résultant de deux mouvements *aaa* et $a_1a_1a_1$, dont la différence *de phase n'est pas un nombre* exact de demi-longueurs d'onde.

2. *On peut citer les expériences d'Hopkins*, de Lissajous, d'Helmholtz, de *Kœnig, etc. — Voir Chappuis et Berget, Leçons de Physique générale*, t. III.

d'ondes sonores se propagent dans l'intérieur d'un tuyau sonore qui parle : 1° les ondes *directes*, qui proviennent d'un son produit à l'embouchure du tuyau ; 2° les ondes *réfléchies*, qui proviennent de la réflexion du son, soit sur le fond solide des tuyaux fermés, soit sur la masse d'air illimitée qui se trouve à l'orifice des tuyaux ouverts. Dans le premier cas, la réflexion des ondes se fait avec un changement de signe dans leur vitesse de vibration ; elle se fait sans changement de signe dans le second cas. Le système d'ondes réfléchies peut être considéré comme provenant d'un corps sonore fictif identique au corps sonore réel (au même titre que l'image d'un point lumineux est identique à ce point) ; il peut donc *interférer* avec le système des ondes directes. Il y a donc production de franges silencieuses, qui sont les nœuds, et de franges sonores, qui sont les ventres, et ces franges sont des plans perpendiculaires à l'axe du tuyau.

Quant aux variations de densité et de pression qui caractérisent les nœuds, elles résultent des condensations et des raréfactions successives des ondes, en vertu desquelles les tranches d'air s'approchent et s'éloignent alternativement des nœuds. A l'instant où les ondes marchent les unes vers les autres

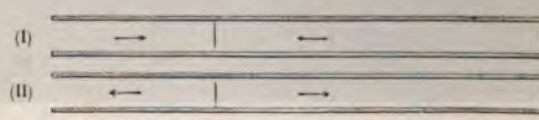


Fig. 315.

(fig. 315, I), il y a condensation ; dans l'instant suivant les ondes s'éloignent (fig. 315, II), et il y a raréfaction ; mais dans les deux cas, les vitesses étant égales et de signes contraires, la tranche de séparation, ou le nœud, est toujours immobile.

Formules des tuyaux. — Non seulement le principe des interférences explique l'existence des nœuds et des ventres de vibration, mais il permet d'en déterminer géométriquement la situation dans la longueur du tuyau. Il n'y a qu'à faire intervenir une condition supplémentaire : c'est que la longueur du tuyau doit être telle, que le plan de l'embouchure du tuyau soit, dans tous les cas, un ventre de vibration. C'est ainsi qu'on trouve les formules (323) qui comprennent toutes les lois des tuyaux.

327. **Battements.** — Le phénomène des *battements* fut découvert par le physicien Sauveur.

Quand deux sons, qui diffèrent très peu de hauteur, sont produits simultanément, on perçoit, outre l'impression désagréable qui résulte de leur dissonance, des *renforcements* et des *affaiblissements périodiques* très nets. C'est surtout aux renforcements, aux coups de force, qu'on donne le nom de *battements ; mais* les affaiblissements sont dus à la même cause, et font partie en *quelque sorte du même* phénomène.

On a découvert par l'expérience que le nombre de ces battements dépend à *la fois de l'intervalle* des deux sons et de leur hauteur absolue : il est égal à la

différence des nombres de vibrations des deux sons. Par exemple, si l'on produit simultanément la note ut_1 (28 vibrations simples) et une note peu inférieure à l'ut_1 ♯ (faisant 33 vibrations), on aura 5 battements par seconde. Si l'on produisait les mêmes notes à l'octave aiguë, on aurait 10 battements.

Les battements sont dus à l'interférence de deux ondes, de périodes peu différentes mais inégales, correspondant à des sons très voisins. Supposons, par exemple, que l'un d'eux effectue 8 vibrations simples tandis que l'autre en effectue 9. L'état vibratoire de l'air, sur le chemin commun aux deux ondes, pourra être représenté par les deux courbes de la figure 316. Il se produit ici un phénomène analogue à celui de la méthode des coïncidences de Borda : seulement le phénomène actuel est sensible à l'ouïe, au lieu d'être sensible à la vue, comme celui des deux pendules. A l'instant où les mouvements des deux

Fig. 316.

ondes sonores sont exactement opposés, leurs effets se détruisent à peu de chose près, et il y a un affaiblissement correspondant dans l'intensité totale des deux sons. A partir de cet instant, on voit que les deux ondes se séparent peu à peu ; l'une d'elles, celle qui provient du son le plus élevé, prend de l'avance sur l'autre, jusqu'à ce qu'elle se trouve exactement dans la même phase que celle-ci : ce qui arrive lorsque le son correspondant a fait 4 1/2 vibrations tandis que l'autre en a fait 4 : à ce moment, il y a *coïncidence* des deux ondes, les effets s'ajoutent et l'intensité totale des deux sons subit un renforcement : il y a un *battement*. Enfin, à partir de cet instant les ondes se séparent de nouveau de plus en plus, jusqu'à se retrouver chacune dans une phase exactement opposée, ce qui a lieu au bout de 4 1/2 vibrations complètes du son le plus aigu et de 4 vibrations du son le moins aigu.

Ces deux états successifs, d'*opposition* et de *coïncidence* des ondes, sont marqués sur la figure 316 par des couples de flèches, tantôt opposées, tantôt juxtaposées, aux points correspondants.

CHAPITRE V

ANALYSE ET SYNTHÈSE DES SONS. — TIMBRE. — PERCEPTION DES SONS.

328. Analyse des sons. — Méthode de M. Helmholtz : Résonance et résonateurs. — *C'est M. Helmholtz* qui a démontré le *premier, en 1863, que la plupart* des sons que l'on regardait

comme simples, sont composés. Sa méthode est fondée sur la *résonance*, c'est-à-dire sur la propriété qu'ont les caisses sonores, quand elles sont de dimensions convenables, de vibrer spontanément à l'unisson d'un son donné, et de le renforcer. Les caisses de résonance employées par M. Helmholtz sont des globes creux, de laiton, dont les dimensions varient de manière qu'ils puissent renforcer toutes les notes de la gamme : c'est ce qu'il a appelé des *résonateurs*.

Chaque résonateur est percé, aux deux extrémités d'un même diamètre, de deux trous circulaires (fig. 317) ; à l'un est fixée une tubulure cylindrique *a*, à l'autre une tubulure conique *b*. La hauteur du son avec lequel s'accorde un résonateur dépend de ses dimensions et de la grandeur de l'ouverture *a*. L'opérateur reçoit le son extérieur par l'orifice *a* tandis qu'il introduit le cône *b* dans l'une de ses oreilles, en ayant soin de boucher l'autre. En expérimentant ainsi, l'oreille est sourde pour tout autre son que celui du résonateur, tandis que ce son est perçu distinctement dès qu'il est produit, quoique faible et mélangé avec d'autres harmoniques. De là un procédé très sensible pour distinguer un son entre un grand nombre d'autres.

Fig. 317.

C'est avec des résonateurs diversement accordés que Helmholtz a décomposé les sons des différents instruments de musique et de la voix humaine et même certains bruits.

529. **Résonateurs** et **Appareil analyseur de Kœnig**. — Le résonateur de Helmholtz a été perfectionné par Kœnig, ainsi que la méthode d'analyse des sons. Le résonateur de Kœnig est cylindrique et muni d'un tirage, comme une lunette ; l'extrémité qui reçoit le son peut se tirer plus ou moins, de manière à faire varier à volonté *le volume du gaz* vibrant (fig. 318). Le son devenant alors de *plus en plus grave*, un même résonateur peut servir à renforcer *successivement* plusieurs notes. Sur l'extrémité conique peut

Fig. 318.

s'appliquer un tuyau de caoutchouc qui sert à relier le résonateur à des flammes manométriques.

L'application successive de résonateurs différents à l'oreille était une opération lente et pénible dans la méthode de Helmholtz. C'est pourquoi Kœnig a imaginé un appareil dans lequel une série de résonateurs agissent sur des flammes manométriques : les sons deviennent alors *visibles* et ils peuvent être montrés à un nombreux auditoire.

Cet appareil consiste en un châssis de fonte XY (fig. 319), sur

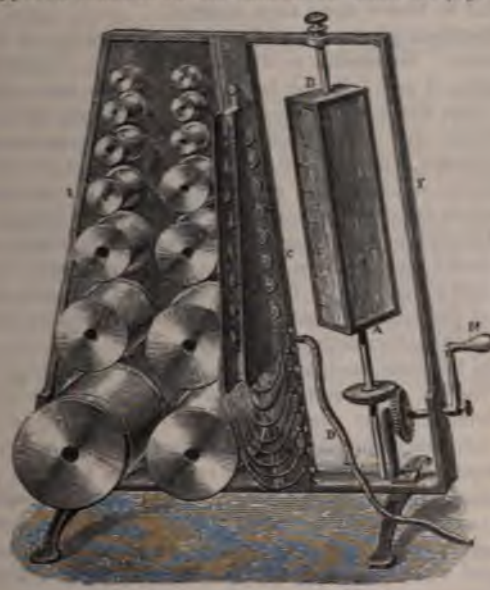


Fig. 319.

lequel sont fixés, en deux séries parallèles, quatorze résonateurs accordés pour donner quatre octaves et demie (de fa_1 à ut_5) ; une chambre C reçoit le gaz d'éclairage par un tuyau de caoutchouc D, et elle porte huit becs munis chacun d'une capsule manométrique. Chaque bec est en communication avec la chambre C par un tuyau de caoutchouc spécial, tandis que derrière l'appareil d'autres tuyaux relient chaque bec à l'un des résonateurs. On voit, à droite des becs, un *système de miroirs* tournants AB qui *permet de manifester la dentelure des flammes* vibrantes.

Supposons, par exemple, que le plus grand résonateur à gauche soit accordé pour renforcer le son 1 et les sept autres avec les harmoniques de ce son, et que tous les huit soient en communication chacun avec un bec de gaz. Qu'on produise alors le son 1 devant l'appareil : si ce son est simple, le résonateur inférieur parle seul, et la flamme correspondante est seule dentelée ; mais si le son fondamental est accompagné d'un ou de plusieurs de ses harmoniques, les résonateurs consonants parlent en même temps, ce qu'on reconnaît aux dentelures de leurs flammes. Le son produit se trouve donc ainsi analysé.

550. **Résultats généraux. — Cause du timbre.** — A l'aide de ces appareils, Helmholtz a d'abord démontré l'existence des *sons simples*, et puis analysé la composition des *sons composés*.

1° Les sons simples sont ceux qui résultent d'une seule espèce de vibrations, sans aucun mélange des sons harmoniques ni de sons accessoires. Un diapason, qu'on fait vibrer à l'orifice d'un tuyau sonore, rend un son simple. Une flûte, la voix humaine prononçant la syllabe *ou*, rendent des sons *presque* simples, parce que les harmoniques accompagnant le son fondamental ont une faible intensité. Le caractère physique des sons *simples*, c'est que, s'ils diffèrent entre eux par la hauteur et par l'intensité, ils *ne se distinguent pas* sensiblement par leur *timbre* ; seuls les sons *composés* ont des *timbres nettement distincts*.

2° Parmi les sons composés, Helmholtz a établi deux catégories. Les uns ne sont pas formés par la superposition d'harmoniques véritables ; leur son fondamental est accompagné de sons partiels, non harmoniques, qui sont plus ou moins persistants, plus ou moins réguliers : tels sont ceux qu'on tire des plaques métalliques, des cloches de verre ou de métal. Les sons composés de cette catégorie *sont dépourvus du caractère musical*. Ceux au contraire qui sont constitués par un son fondamental, accompagné d'harmoniques proprement dits, possèdent à un haut degré le *caractère musical* : tels sont ceux que rendent les divers instruments de musique.

3° Pour les sons musicaux proprement dits, Helmholtz a démontré que les différences de timbre sont dues non seulement à la multiplicité plus ou moins grande des harmoniques supérieurs, mais à leur degré d'intensité plus ou moins élevé.

4° *Timbre des voyelles.* — En appliquant sa méthode d'analyse aux sons émis par la voix humaine, il a constaté dans ceux-ci *l'existence des harmoniques* : ce sont donc des sons musicaux. *Les 6 ou 8 premiers* harmoniques sont nettement perceptibles *dans chacune des voyelles* émises par la bouche humaine, mais

ces divers harmoniques prennent des degrés d'intensité divers suivant la forme qu'affecte la cavité buccale en les prononçant ; or cette forme est déterminée par la voyelle qu'on veut prononcer. Ainsi la différence d'intonation des diverses voyelles tient à ce qu'elles ont chacune un timbre spécial, et ce timbre est déterminé par la prédominance de tel ou tel harmonique, de hauteur définie.

Par exemple, la voyelle *a* est caractérisée par la prédominance de la note $si_4\flat$. Quand on prononce la voyelle *a*, à une hauteur quelconque, c'est le *si*♭ qui est le son dominant parmi les harmoniques rendus par la cavité buccale.

Le son caractéristique de la voyelle *o*, c'est le *si*♭; celui de la diphtongue *ou* est le fa_2.

Quelques autres voyelles ou diphtongues sont caractérisées par deux harmoniques prédominants, l'un aigu, l'autre grave. Ainsi, pour la voyelle *e*, ce sont le fa_2 et le *si*♭, simultanés ; pour *i*, ce sont fa_2 et $ré_6$; pour *u*, fa_2 et sol_5 ; pour la diphtongue *ai*, ce sont $ré_4$ et sol_5, et pour *eu*, fa_5 et ut_5[1].

331. Synthèse des sons. — Helmholtz ne s'est pas borné à décomposer les sons, il a vérifié les résultats de son analyse par la synthèse, c'est-à-dire qu'il a reproduit un son donné, par la superposition des sons simples qu'il avait découverts à l'aide de l'appareil analyseur. Il s'est servi, pour opérer cette synthèse, d'un autre appareil, très ingénieux, mais assez compliqué, et dont la description ne peut trouver place dans un traité élémentaire.

PERCEPTION DES SONS.

332. Description de l'oreille. — La perception des sons est faite par le sens de l'*ouïe*, au moyen d'un organe spécial appelé *oreille*. L'oreille est représentée dans son ensemble par la figure 320, et dans ses détails par les figures 321 et 322.

On peut y distinguer trois régions : l'*oreille externe*, l'*oreille moyenne* et l'*oreille interne*.

Oreille externe. — Elle se compose de trois parties :

1° Le *pavillon* A, membrane cartilagineuse, externe : c'est ce qu'on appelle oreille dans le langage ordinaire;

2° et 3° Le *conduit auditif* B, qui part de la *conque*, ou fond évasé du pavillon, pour se terminer à l'*oreille moyenne* par la *membrane du tympan* C.

1. Ces indications ne sont exactes qu'autant qu'on suppose ces voyelles prononcées par un Allemand du Nord, comme dans les expériences de Helmholtz.

Oreille moyenne. — Elle est constituée par la *caisse du tympan* et ses accessoires.

Le tympan C est une membrane mince et délicate, qui est tendue obliquement sur l'axe du conduit auditif. Elle forme l'un des fonds d'une espèce de tambour sonore, appelé *caisse du tympan*, dont l'autre fond est une membrane élastique.

Cette caisse est munie de quatre ouvertures : la première est à sa partie supérieure; la deuxième, au bas du tympan, sert d'orifice à un canal, appelé *trompe d'Eustache*, qui fait communiquer

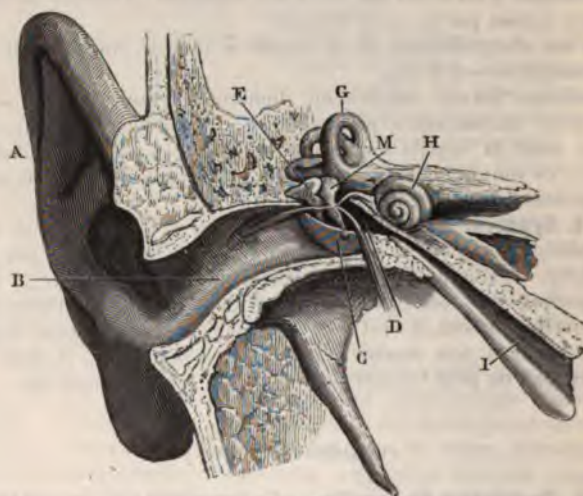


Fig. 320.

l'oreille moyenne avec l'air extérieur, par l'intermédiaire des *fosses nasales*. Les deux autres sont pratiquées dans la membrane qui est vis-à-vis du tympan et sont appelées, à cause de leurs formes respectives, l'une *fenêtre ronde* et l'autre *fenêtre ovale*. Les deux fonds du tambour sont reliés par une suite de petits os, la *chaîne des osselets* (fig. 321). L'un, le *marteau* M, s'appuie d'une part sur le tympan et de l'autre sur l'*enclume* E; puis viennent l'*os lenticulaire* L et l'*étrier* K dont la base est unie à la membrane de la *fenêtre ovale*. Deux petits muscles servent à mouvoir *le marteau et l'étrier* et à les appuyer plus ou moins sur les membranes voisines.

Oreille interne. — C'est la partie essentielle de l'organe, et elle

est protégée par les parties les plus dures de l'os temporal, appelées *rocher*. Elle est composée de trois cavités : à la partie inférieure, le *limaçon* H (que la figure 322 représente en coupe) ; au milieu, le *vestibule*, et en haut les canaux *semi-circulaires* G. Leur ensemble constitue le *labyrinthe*, qui est tapissé intérieurement

Fig. 321.

Fig. 322.

d'une membrane que baigne un liquide gélatineux. C'est dans ce liquide que viennent plonger les innombrables terminaisons du nerf acoustique. M. de Corti a démontré qu'il y en avait environ trois mille ; on les appelle *fibres de Corti*.

333. Mécanisme de l'audition. — Le pavillon recueille les ondes sonores venues de l'extérieur, les rassemble, les réfléchit et les dirige dans le conduit auditif.

Le conduit auditif externe transmet les ondes, en les renforçant, à la membrane du tympan. Celle-ci se met à vibrer et ses vibrations sont transmises par la chaîne des osselets jusqu'à l'oreille interne. Non seulement les osselets transmettent les vibrations plus fidèlement que ne le ferait un corps gazeux, mais ils règlent, en quelque sorte, la sensibilité des membranes de la caisse sonore en les tendant plus ou moins, suivant l'intensité ou l'acuité des sons extérieurs. Enfin la perception définitive du son se fait par l'intermédiaire des trois mille filets du nerf acoustique. Helmholtz admet que chaque fibre, accordée comme un petit résonateur pour une note particulière, ne vibre qu'à l'unisson de cette note, et est sourde pour toutes les autres. Chaque son simple ne fait donc vibrer qu'une seule fibre, tandis que les sons composés en font vibrer plusieurs. C'est par suite de cette perception propre des sons simples par chacune des fibres de Corti que l'oreille distingue un son entre plusieurs autres et perçoit, dans leur ensemble, les sons les plus complexes et les plus riches en harmoniques.

Remarque. — *Les divers organes qui constituent l'oreille sont*

utiles à divers degrés pour rendre la sensation plus complète et le sens de l'ouïe plus délicat ; mais il n'y en a qu'un parmi eux qui soit indispensable : c'est l'*oreille interne* et même le *vestibule*. Ainsi la perte ou la déchirure du *tympan* et la suppression des *osselets* n'entraînent pas la surdité complète.

Chez les crustacés et chez les céphalopodes[1], le sens de l'ouïe n'a pas d'autre organe que le *vestibule*. Les autres parties de l'oreille interne n'apparaissent successivement que chez les êtres de plus en plus élevés dans l'échelle animale, et on ne les trouve au complet que chez l'homme.

1. Chez les autres mollusques, il n'y a pas de sens auditif. On ne connaît pas non plus d'organe auditif chez les *insectes* ; mais on sait que la fonction existe.

LIVRE VII

OPTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

354. **Définitions générales.** — *Lumière.* — On appelle *lumière* la cause des phénomènes qui provoquent en nous, par l'intermédiaire du sens de la vue, les sensations *de la vision*. Ces phénomènes sont appelés eux-mêmes *phénomènes lumineux*.

Corps lumineux, corps éclairés. — On nomme corps *lumineux* ceux qui émettent de la lumière par eux-mêmes, comme le soleil, les étoiles et les corps en ignition. Les corps non lumineux peuvent aussi devenir visibles pour nous, à la condition d'être *éclairés*, c'est-à-dire de recevoir, d'une source quelconque, de la lumière, qu'ils renvoient ensuite dans toutes les directions. La lune, les planètes et presque tous les objets terrestres sont dans ce dernier cas.

Corps transparents, corps translucides. — Les corps *transparents* ou *diaphanes* sont ceux qui laissent facilement passer la lumière ; à travers ces corps on distingue nettement les objets : tels sont l'eau, les gaz, le verre poli. Les corps *translucides* sont ceux au travers desquels on perçoit encore la lumière, mais sans pouvoir reconnaître la forme des objets : tels sont le verre dépoli, le papier huilé.

Corps opaques. — Enfin, on appelle *corps opaques* ceux qui ne se laissent nullement traverser par la lumière, comme le bois, les métaux. Toutefois il n'y a pas de corps absolument opaques L'opacité des corps dépend de leur épaisseur : tous sont plus ou moins translucides lorsqu'ils sont réduits en feuilles assez minces.

Milieu transparent, milieu homogène. — On appelle en général *milieu* l'espace, plein ou vide, dans lequel se produit un phénomène. L'air, l'eau, le verre sont des milieux où peut se pro-

pager la lumière, et qu'on nomme, pour cette raison, *milieux transparents*. Un milieu est dit *homogène*, lorsque sa composition chimique et sa densité sont les mêmes en tous ses points.

335. **Optique géométrique. — Optique physique.** — On désigne sous le nom d'*optique* la partie de la physique qui comprend l'étude des phénomènes lumineux.

On établit ordinairement dans l'optique deux grandes divisions : l'*Optique géométrique* ou *Optique élémentaire* et l'*Optique physique* ou *haute Optique*, qui se distinguent l'une de l'autre non seulement par leur objet, mais aussi par leur méthode.

L'*Optique géométrique* ne comprend que les phénomènes lumineux les plus simples, les plus communs, les plus faciles à observer et à reproduire, tels que la réflexion de la lumière sur les miroirs. On les étudie sans faire aucune hypothèse sur leur cause, on en détermine les lois par l'expérience, et on déduit les conséquences de ces lois par le raisonnement géométrique. Dans l'*Optique physique* on procède tout autrement. On pose d'abord une hypothèse sur la nature de la lumière, — c'est l'hypothèse des ondulations ; — on la développe par l'analyse mathématique et on en déduit, *à priori*, non seulement les faits anciennement connus et les lois expérimentales de l'optique géométrique, mais des faits complètement nouveaux et absolument imprévus, tels que celui-ci : *de la lumière ajoutée à de la lumière produit de l'obscurité*. L'expérimentation n'intervient qu'à la suite du calcul, pour en vérifier toutes les conséquences, par des expériences très délicates et au moyen d'instruments d'une grande précision.

DIRECTION DE LA PROPAGATION.

336. **Loi de la propagation rectiligne.** — *Dans tout milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite.*

Cette loi est vérifiée par les deux faits suivants :

1° Si l'on interpose un corps opaque sur la ligne droite qui joint l'œil à un point lumineux, la lumière est interceptée.

(On appelle *point lumineux* une source lumineuse réduite à des dimensions géométriques aussi petites que possible.)

2° La lumière qui pénètre dans une chambre noire par une petite ouverture trace dans l'air un trait lumineux rectiligne. Ce trait est visible, parce qu'il éclaire les poussières légères en suspension dans l'atmosphère (fig. 323).

Corollaires. — 1° *Définitions.* — Toute direction rectiligne suivant laquelle se propage la lumière s'appelle *rayon lumineux* ; un ensemble de rayons prend le nom de *faisceau*, et un faisceau très délié celui de *pinceau*.

Quand les rayons lumineux viennent en divergeant d'une *source lumineuse* voisine ou vont en convergeant vers un lieu *peu éloigné*, le faisceau ou le pinceau est dit divergent ou con-

vergent. Dans le cas où la source lumineuse est à une très grande distance, comme le sont par exemple les astres, l'angle de divergence des rayons extrêmes du faisceau ou du pinceau est insensible ; les rayons sont physiquement parallèles entre eux, et le faisceau ou le pinceau est dit *parallèle.* Il en est de même lorsque le point de convergence des rayons est très éloigné : le faisceau *convergent* devient un *faisceau parallèle.*

Fig. 323.

2° *Conséquences.* — De cette loi on déduit deux conséquences géométriques importantes :

1° La théorie des *ombres portées par les corps opaques* ;

2° La théorie des *images fournies par les petites ouvertures.*

337. **Théorie géométrique des ombres.** — 1° *Définitions.* — On appelle *ombre d'un corps* opaque, ou mieux *ombre portée* par un corps opaque, le lieu de l'espace où ce corps empêche la lumière de pénétrer. Le problème géométrique des ombres consiste à

Fig. 324.

déterminer géométriquement l'étendue et la forme de l'ombre portée par un corps opaque quelconque placé devant une source de lumière quelconque. Il y a deux cas à considérer, celui d'une source réduite à un point lumineux et celui d'un objet lumineux.

2° *Cas d'un point lumineux.* — Soient S (fig. 324) le point lumineux et *M le corps qui porte ombre* et que nous supposerons sphérique.

Si l'on conçoit qu'une droite indéfinie SG *se meuve autour de la sphère* M, *en lui restant tangente et en passant constamment par le point* S, *cette droite engendre une surface conique de révolution, tangente à la sphère et séparant dans l'espace la portion qui est dans l'ombre de celle qui est éclairée.*

En effet, tout point tel que O intérieur à ce cône ne peut être éclairé, puisque la ligne droite SO rencontre le corps opaque.

Si l'on place au delà du corps opaque un écran PQ, le passage de l'ombre à la lumière sur cet écran a lieu brusquement, sans aucune *dégradation*.

Remarque. — La circonférence *de contact* du cône tangent avec le corps opaque partage, en outre, la surface de celui-ci en deux hémisphères, l'un obscur et l'autre éclairé.

3° *Cas d'un objet lumineux. — Pénombre.* — Supposons que la

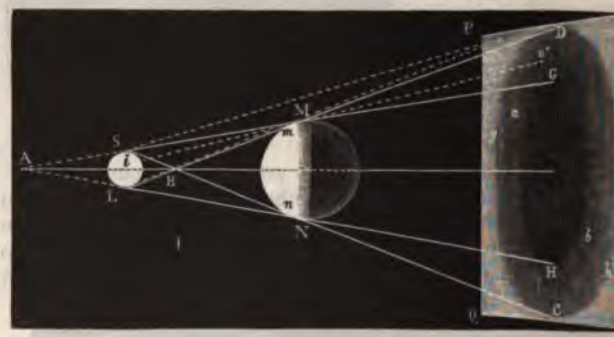


Fig. 325.

source lumineuse et le corps opaque soient deux sphères SL et MN (fig. 325).

Si l'on conçoit qu'une droite indéfinie AG *se meuve tangentiellement à ces sphères, en coupant constamment la ligne des centres au point* A, *elle engendre une surface conique qui a pour sommet ce point, et qui limite, derrière la sphère* MN, *un espace* MGHN *complètement privé de lumière.*

Si, de même, une seconde droite LD, *coupant la ligne des centres en* B, *tourne tangentiellement aux deux sphères de manière à engendrer une nouvelle surface conique* DBC, *qui a son sommet en B, toute la partie extérieure à cette surface reste complètement dans la lumière.*

En effet, si l'on place un écran PQ au delà du corps opaque,

on y distingue nettement trois régions : 1° une zone centrale HG complètement obscure, qui est limitée par la surface conique des tangentes communes *extérieures* AMG et ANH ; 2° une zone périphérique, complètement éclairée, qui est limitée intérieurement par la surface conique des tangentes communes *intérieures* LBMD et SBNC ; 3° enfin une zone intermédiaire, qui est limitée intérieurement par le cône des tangentes extérieures MG et NH, et extérieurement par le cône des tangentes intérieures MD et NC. Cette zone n'est ni complètement éclairée ni complètement obscure, mais l'ombre y va en *se dégradant*, c'est-à-dire en s'atténuant, depuis la zone centrale jusqu'à la zone périphérique : c'est ce qu'on appelle la *pénombre* ; son éclairement croît depuis G jusqu'à D.

On voit en effet qu'un point quelconque *a* de la zone centrale GaHb ne peut recevoir de [illegible] un des points du corps lumineux, puisque toute [illegible] point *a* à la source rencontrerait nécessairement [illegible] corps opaque. Au contraire, tout point *o* de l'écran situé en dehors de la surface DBC peut être joint par une droite à tous les points de SL sans interposition du corps opaque et reçoit, par conséquent, la lumière de tous ces points. Enfin tout point *o'* compris entre les deux surfaces coniques ne peut recevoir de lumière que des points de SL situés au-dessus de *o'i* ; donc le point *o'* est moins éclairé que le point *o* et d'autant moins éclairé qu'il est plus près de la zone centrale.

Remarques. — 1° Si l'on trace sur la sphère opaque deux cercles MN et *mn*, qui passent par les points de contact des tangentes AG et BD, on a une zone *mn*MN à laquelle aussi correspond une pénombre.

2° *Reflet*. — Lorsqu'un corps opaque intercepte la lumière par l'une de ses faces, la face opposée n'est jamais complètement obscure ; elle est toujours plus ou moins éclairée par la lumière que réfléchissent les corps voisins. C'est l'effet de cette réverbération qu'on nomme *reflet*. Or, la lumière réfléchie par un corps coloré participant de la couleur propre de ce corps, les reflets prennent eux-mêmes la teinte des objets environnants.

338. **Applications.** — La théorie géométrique des ombres s'applique à un grand nombre de cas usuels. La pénombre peut se voir nettement autour de l'ombre portée par les arbres, les maisons, les édifices, exposés au soleil. Toutes les fois que la lumière d'une source artificielle, ayant une certaine étendue, telle qu'une flamme de bougie, ou de lampe, ou de bec de gaz, est interceptée par un *corps opaque, on observe que* l'ombre portée sur les murs *n'est jamais nettement limitée* dans ses contours : elle est plus ou

moins estompée par la pénombre. La pénombre devient, au contraire, insensible, et l'ombre de plus en plus tranchée, quand la source lumineuse se réduit à un point lumineux : c'est le cas de l'éclairage par l'arc voltaïque.

Éclipses. — L'explication du grand phénomène astronomique des éclipses est une conséquence directe de la théorie des ombres.

339. **Images données par les petites ouvertures.** — Lorsque la lumière extérieure pénètre dans une *chambre noire, par une petite ouverture* pratiquée dans un volet, si l'on reçoit les rayons sur un écran, ils y peignent l'image des objets extérieurs. *Ces images plus ou moins nettes, mais colorées comme les objets eux-mêmes,* présentent les caractères suivants : 1° *elles sont renversées ;* 2° *leur forme est indépendante de celle de l'ouverture.*

Ce phénomène curieux s'explique aisément par la propagation

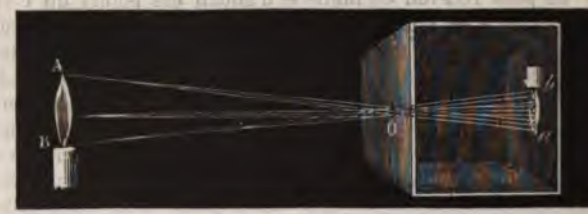


Fig. 326.

rectiligne de la lumière. Soit une ouverture triangulaire O (fig. 326), pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, et soit un écran *ab* sur lequel on reçoit l'image d'une flamme AB placée à l'extérieur. De chaque point de la flamme part un pinceau lumineux divergent qui pénètre dans la chambre et vient former sur l'écran une image triangulaire semblable à l'ouverture, comme le montre le dessin. L'ensemble de toutes ces images partielles produit une image totale de même forme que l'objet éclairant et où la forme de l'ouverture disparaît complètement. En effet, si la lumière est très loin et l'ouverture très petite, le pinceau envoyé par chaque point lumineux se réduit sensiblement à son axe. Or, si l'on conçoit qu'une droite indéfinie se meuve dans l'ouverture du volet, supposée très petite, avec la condition que cette droite reste toujours tangente à l'objet lumineux AB, elle décrit, dans son mouvement, deux surfaces coniques ayant pour sommet *commun l'ouverture* même de la chambre noire, et pour base *l'une le corps lumineux*, l'autre la partie éclairée de l'écran, *c'est-à-dire l'image*. Si l'écran est perpendiculaire à la droite qui

joint le centre de l'ouverture au centre du corps lumineux, l'image est semblable à ce corps; si l'écran est oblique, l'image est allongée dans le sens de l'obliquité.

Remarque. — On observe ces deux cas dans les ombres portées par le feuillage des arbres : les faisceaux lumineux qui passent à travers les feuilles donnent des images du soleil qui sont rondes ou elliptiques, suivant que la surface sur laquelle elles se projettent est perpendiculaire ou oblique aux rayons solaires, et cela quelle que soit, entre les feuilles, la forme des interstices à travers lesquels passe la lumière.

VITESSE DE PROPAGATION.

340. Vitesse de la lumière. — Historique et résultats. — La lumière se propage avec une vitesse telle, qu'on ne peut, à la surface de la terre, et dans les circonstances ordinaires, constater aucun intervalle appréciable entre l'instant où un phénomène lumineux se produit et celui où l'œil le perçoit à une distance quelconque : aussi, jusqu'au XVIe siècle, a-t-on admis comme évident que la propagation de la lumière est *instantanée*, autrement dit que sa vitesse est *infinie*. Bacon le premier émit cette idée que la lumière doit mettre un temps appréciable pour se propager d'un point à un autre, et Galilée *le premier* essaya de mesurer ce temps.

Méthode de Rœmer. — Ce fut Rœmer qui donna les premiers nombres plausibles et acceptables pour la vitesse de la lumière. Il les déduisit de l'observation attentive et de l'interprétation judicieuse d'un phénomène astronomique.

Principe de la méthode. — On sait que le premier satellite de Jupiter (le plus rapproché des quatre) fait ses immersions dans l'ombre projetée par la planète à des intervalles de temps égaux, qui sont de $42^h\,28^m\,36^s$.

Or, supposons qu'on observe l'instant d'une première immersion lorsque Jupiter est en j et la Terre en T (fig. 327); puis une seconde immersion quand ces deux astres sont en j' et en T', c'est-à-dire lorsque la distance de la Terre à Jupiter est augmentée de tout le diamètre de l'orbite terrestre. Au lieu de trouver que le temps écoulé entre ces deux observations soit un multiple de $42^h\,28^m\,36^s$, égal au nombre n d'éclipses qui s'est produit pendant le passage de la Terre de T en T', on trouve un temps θ qui est égal à n fois $42^h\,28^m\,36^s$ *plus* un excès θ'. C'est évidemment pour parcourir l'accroissement de distance TT' qu'il a fallu à la lumière un intervalle θ' de plus que la durée calculée. On en conclut que, pour parcourir la distance D de la Terre au Soleil, c'est-à-dire $\frac{1}{2}$ TT', la lumière met un *temps* $t = \frac{1}{2}\theta'$ *et que* la vitesse V de la lumière est *donnée par l'équation* $V = \frac{D}{t}$.

Résultats. — La précision des résultats de cette mesure dépend donc de l'exactitude avec laquelle les nombres D et t ont été déterminés. Or, d'une part, la distance du Soleil à la Terre, qui est une fonction de la *parallaxe solaire*,

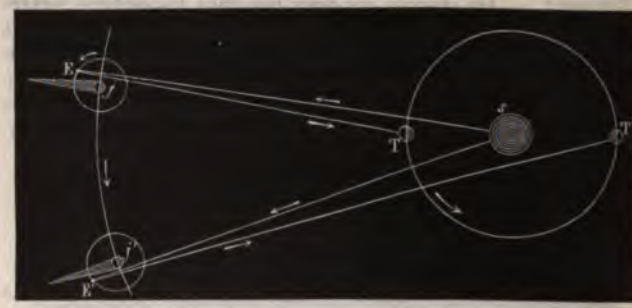


Fig. 327.

n'était connue du temps de Rœmer que fort imparfaitement. D'autre part, l'évaluation de t (qu'il trouva égal à 11 minutes) était entachée d'une grosse erreur, parce qu'elle était déduite d'un nombre d'observations insuffisant. Pour ces deux motifs, le nombre trouvé par Rœmer, 48 000 lieues (de 25 au degré), n'était pas suffisamment exact, et n'a pas été conservé.

Calculs de Delambre. — Delambre reprit les calculs de Rœmer, en se servant de 5000 observations qui embrassaient une période de 140 années. Il trouva pour t la valeur (beaucoup plus exacte) de $8^m 13^s$, ou mieux $493^s,243$. Quant à la distance D, les observations relatives aux passages de Vénus de 1761 et de 1769 avaient permis de la calculer avec une approximation bien supérieure à celle des évaluations antérieures. Avec les valeurs admises pour ces deux coefficients, Delambre trouva V = 310 000 kilomètres.

En adoptant pour la parallaxe le nombre actuel $8^s,86$ qui paraît plus exact, la valeur de la vitesse se réduit à 299 000 kilomètres par seconde.

Méthodes physiques. — Les résultats de ces méthodes astronomiques ont été confirmés par des mesures directes, faites à l'aide de méthodes purement physiques, en 1839, par M. Fizeau, puis par Léon Foucault de 1850 à 1862, enfin par M. Cornu en 1873 et 1875.

M. Fizeau a trouvé 315 000 kilomètres par seconde, nombre qui se rapproche beaucoup de l'un des deux qui résultent de la méthode de Rœmer. M. Cornu, qui a employé le même procédé en le perfectionnant dans les détails, a trouvé 298 400 kilomètres dans une première série d'expériences, et dans une deuxième série 300 400 kilomètres (avec une approximation qu'il estime à

1/100 en plus ou en moins). Ce nombre diffère peu de l'un de ceux de la méthode de Bradley. Enfin Foucault avait trouvé le nombre 298 000 kilomètres. On ne s'éloignera donc pas beaucoup de la vérité en adoptant 300 000 kilomètres par seconde pour représenter la vitesse de la lumière dans l'air.

Ajoutons que les expériences de Foucault le conduisirent en outre à ce résultat très important au point de vue théorique, que la vitesse de propagation de la lumière est *moins grande dans l'eau que dans l'air*.

341. **Expériences de M. Fizeau.** — M. Fizeau a mesuré directement la vitesse de la lumière en cherchant le temps qu'il faut à un rayon lumineux pour aller de Suresnes à Montmartre et pour en revenir.

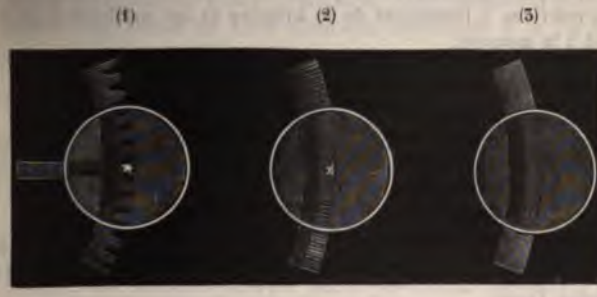


Fig. 328.

Son appareil consistait en une roue dentée, tournant à une vitesse plus ou moins grande, et dont les dents étaient espacées, deux à deux, par un intervalle rigoureusement égal à leur épaisseur. Cette roue et le mécanisme qui la faisait tourner étaient installés à Suresnes : un faisceau de lumière parallèle passait entre deux dents, et allait se réfléchir sur un miroir placé à Montmartre, d'où il était dirigé par un système de tubes et de lentilles et ramené vers la roue. Si celle-ci était au repos, le faisceau repassait exactement entre les mêmes dents qu'à son départ; mais si la roue tournait assez vite pour qu'une dent eût pris la place d'un intervalle, le faisceau lumineux était intercepté, et l'observateur ne voyait plus rien dans la lunette qu'il pointait sur la roue. Pour une plus grande vitesse de rotation, l'intervalle vide entre les deux dents suivantes avait pris la place du premier au moment du retour du faisceau, et l'image reparaissait.

Tout se passait donc comme si l'on avait abaissé, puis relevé alternativement un écran entre le point lumineux et l'observateur. Le n° 1 de la figure 328 montre le point lumineux vu à travers les dents de la roue immobile; le n° 2 montre la disparition partielle du point lumineux, et le n° 3 en montre la disparition totale. *Nous avons donné ci-dessus* les résultats numériques de ces *mesures.*

INTENSITÉ DE LA LUMIÈRE. — PHOTOMÉTRIE.

342. **Définitions.** — *Intensité d'une source de lumière.* — L'éclairement produit sur une surface déterminée par une source de lumière dépend à la fois de sa nature, de sa distance et de l'inclinaison de ses rayons. Si donc on veut apprécier le pouvoir éclairant d'une source, il faut la placer dans des conditions bien déterminées de distance et d'orientation par rapport à la surface éclairée. On est convenu d'appeler *intensité d'une source lumineuse* la quantité de lumière qu'elle envoie *normalement* sur l'*unité de surface* d'un corps éclairé, placé à l'*unité de distance*.

On appelle *photométrie* la partie de l'optique qui comprend les lois relatives à l'intensité de la lumière et les méthodes qui servent à la *mesurer*.

Étalons de lumière. — Mesurer l'intensité d'une lumière, c'est la comparer à une autre quantité de même espèce, prise pour unité. On emploie plusieurs unités ou *étalons* de lumière.

La Conférence internationale de 1884 a adopté comme *unité pratique* de lumière blanche l'étalon proposé par M. Violle : c'est la quantité totale de lumière émise par 1 centimètre carré de platine, à la température de solidification.

Cette unité étant trop grande pour la pratique, le Congrès des Électriciens de 1889 a adopté la *bougie décimale*, égale à 1/20 de l'*étalon Violle*.

En France, l'unité employée jusqu'ici le plus souvent était le *bec Carcel* : c'est l'intensité lumineuse d'une lampe Carcel brûlant 42 grammes d'*huile de colza épurée* à l'heure [1]. L'étalon Violle vaut 2,08 *becs Carcel*.

En Angleterre, l'unité pratique est le *Candle* ou le *Parliamentary Standard* : c'est l'intensité d'une bougie de spermaceti de 7/8 de pouce de diamètre, et brûlant 120 grammes par heure [2]. L'étalon Violle vaut 15,392 Candles.

En Allemagne, l'unité est le *Kerzen* : c'est l'intensité d'une bougie de paraffine de 20 mm de diamètre brûlant avec une flamme de 5 cm de hauteur. L'étalon Violle vaut 15,808 Kerzen.

Éclairement. — L'unité pratique d'éclairement est la *bougie à 1 mètre* ou la *Carcel à 1 mètre* : c'est l'éclairement produit par une bougie, ou un bec Carcel planté à 1 m de distance. Il faut un

1. *Avec une flamme* de 40 mm et dans les conditions établies par J.-B. Dumas *et Regnault pour la vérification* du pouvoir éclairant du gaz à Paris.
2. *Les variations* de cet étalon peuvent atteindre 30 0/0.

éclairement de 20 à 30 bougies à 1 m, en un point quelconque d'un local, pour qu'il soit suffisamment éclairé. Il faut au moins 30 bougies à 1 m sur une table de lecture pour qu'on y puisse travailler aisément.

343. Méthode photométrique. — Photomètres. — La méthode photométrique usuelle est fondée sur les principes suivants :

1° *La quantité de lumière reçue normalement sur une surface donnée varie en raison inverse du carré de sa distance à la source lumineuse.*

2° (Loi du cosinus). *La quantité de lumière reçue obliquement est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons lumineux avec la normale à la surface éclairée.*

3° *Les intensités de deux sources lumineuses qui produisent, dans les mêmes conditions, le même éclairement, sont directement proportionnelles aux carrés de leurs distances respectives à la surface éclairée.*

Les deux premières lois se démontrent *à priori*, et par le même raisonnement que les lois correspondantes de la chaleur rayonnante [1].

Quant à la troisième loi, elle est une conséquence directe de la première. En effet, soient I et I′ les intensités de deux sources L et L′ qui produisent le *même éclairement* sur une surface orientée de la même façon par rapport à chacune d'elles, mais située à des distances différentes, d et d'. D'après les définitions précédentes, la quantité de lumière envoyée par L sur l'unité de surface de l'écran est égale à $\frac{I}{d^2}$; pour L′, cette quantité est $\frac{I'}{d'^2}$. On a donc

$$\frac{I}{d^2} = \frac{I'}{d'^2}, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}.$$

Cette loi constitue à proprement parler la *méthode photométrique*. Elle est à la fois *vérifiée* et appliquée dans les *photomètres*. Ces appareils n'ont d'autre objet que de produire l'égalité d'éclairement sur une surface donnée, à l'aide des deux sources à comparer, et de permettre, avec plus ou moins de facilité et de précision, la constatation de cette égalité d'éclairement.

344. Photomètre de Rumford. — Il se compose d'un écran de verre dépoli devant lequel est fixée une tige opaque m (fig. 329). A une certaine distance sont placées les lumières qu'on veut comparer, par exemple une lampe et une bougie, de manière que

1. *Nous exposerons cette démonstration à propos de la chaleur.*

chacune d'elles projette une ombre de la tige sur l'écran. Les deux ombres portées sont d'abord d'inégale intensité ; mais, en reculant ou en rapprochant peu à peu la lampe, on trouve une position où l'intensité des deux ombres *a* et *b* est la même. Ces ombres con-

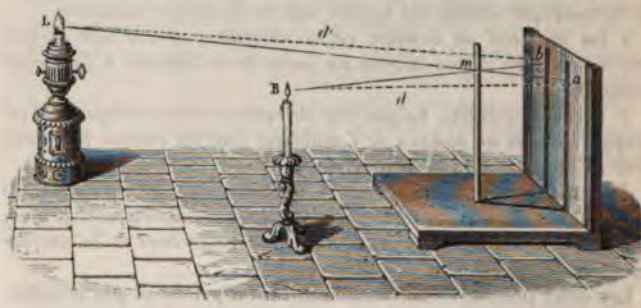


Fig. 329.

stituent alors deux surfaces *également éclairées* par les deux sources ; l'égalité d'éclairement est plus facile à apprécier sur ces deux surfaces peu éclairées que sur tout le reste de l'écran. Alors *les intensités des deux lumières* B *et* L *sont directement proportionnelles aux carrés des distances de chacune d'elles à l'ombre portée par l'autre.* On a donc, en appelant *d* et *d'* les distances respectives de B à *a* et de L à *b*,

$$\frac{B}{L} = \frac{d^2}{d'^2}.$$

Remarque. — Dans la pratique, le moment précis où les ombres atteignent le même degré d'épaisseur est très difficile à saisir, — surtout quand les sources de lumière n'ont pas la même coloration, ce qui est le cas général.

345. **Photomètre de Bunsen.** — Le photomètre le plus employé dans la pratique est le *photomètre à tache*, dû à Bunsen. L'égalité d'éclairement est produite sur une *tache d'huile* placée au centre d'un écran en papier blanc. Vue par réflexion, la tache est plus sombre que le papier ; c'est l'inverse par transparence. On place *cet écran entre* les deux lumières à comparer sur la droite qui les *joint, et l'on déplace* l'écran jusqu'à ce que la tache ait disparu et *que la feuille blanche* paraisse uniformément éclairée ; à ce mo-

ment, les éclairements sont égaux ; on n'a plus qu'à mesurer les distances respectives de chaque source à l'écran.

En disposant deux miroirs plans, également inclinés, de chaque côté du cadre (fig. 330), on verra côte à côte les images des deux faces de la tache, et l'on pourra saisir plus aisément le moment de leur disparition.

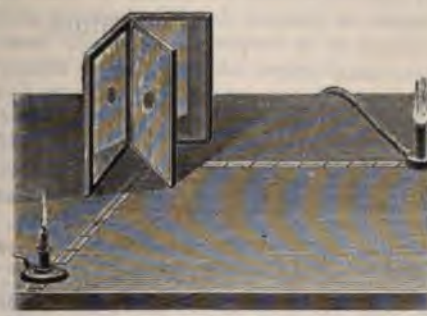


Fig. 330.

346. **Procédé photométrique de M. Crova.** — Le photomètre de Bunsen, tout comme celui de Rumford, ne permet de comparer entre elles que des sources de même teinte. Lorsque les teintes sont différentes, — ce qui est le cas ordinaire, — il faut ramener la mesure au cas de lumières de même teinte, à l'aide du procédé de M. Crova. Il consiste à interposer entre l'œil et l'écran un milieu coloré qui ne laisse passer que des radiations comprises entre certaines limites. Ce procédé n'est pas encore répandu dans la pratique. Cela explique les divergences considérables des nombres donnés par les divers expérimentateurs pour les mêmes sources de lumière, en particulier pour les arcs voltaïques.

347. **Éclat intrinsèque des foyers de lumière.** — On appelle *éclat intrinsèque* d'une source le quotient de son *intensité photométrique* par sa surface. Il dépend plus spécialement de la température du foyer.

Voici quelques nombres que nous empruntons au *Formulaire de l'Électricien* de 1895. Ils ont été déterminés par M. Monnier.

Bec bougie	0,06	par cm.
Bec d'Argand	0,5	—
Brûleur intensif de Siemens	0,6	—
Lampe électrique à incandescence	50	—
Arc voltaïque	480	—
Soleil	50 480	—

CHAPITRE II

CATOPTRIQUE[1]

—

RÉFLEXION SPÉCULAIRE ET MIROIRS PLANS.

348. **Réflexion spéculaire. — Définitions** et **Lois.** — Lorsqu'un rayon lumineux rencontre une surface polie, il s'y réfléchit d'après certaines lois. C'est le phénomène de la *réflexion régulière* ou *réflexion spéculaire*[2].

On appelle *rayon incident*[3] la direction rectiligne suivant laquelle la lumière tombe sur le miroir; *rayon réfléchi*, la direction suivant laquelle la lumière paraît renvoyée par le miroir; *angle d'incidence*, l'angle du rayon incident avec la normale à la surface au point d'incidence; *angle de réflexion*, l'angle du rayon réfléchi avec la même normale.

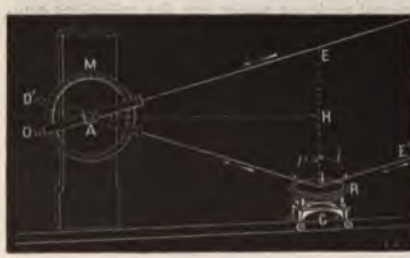


Fig. 331.

Les lois de la réflexion spéculaire sont les suivantes :

1° *Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan, normal à la surface réfléchissante.*

2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

Vérification expérimentale. — Le meilleur procédé est le suivant. On dispose verticalement un cercle gradué M (fig. 331), au centre duquel est fixée une lunette mobile dans un plan parallèle au limbe. On place, à une distance convenable, un bain de mercure dont la surface libre constitue une surface réfléchissante

1. *De* κάτοπτρον, miroir : chapitre de l'optique où l'on étudie la réflexion de la *lumière et ses applications.*
2. *De speculum*, miroir.
3. *Du latin incidere*, tomber.

parfaitement plane et horizontale[1]. Cela fait, on regarde avec la lunette, suivant une direction OE, une étoile de première ou de deuxième grandeur; puis on incline la lunette de manière à apercevoir la même étoile suivant O'I dans le bain de mercure. Cela a lieu lorsqu'on reçoit dans la lunette les rayons réfléchis IA correspondant aux rayons incidents E'I qui viennent de l'étoile. Or on trouve que les deux directions successives de la lunette, et par suite les deux rayons EA et IA font des angles égaux avec l'horizontale AH : d'où il est facile de conclure que l'angle d'incidence E'IE est égal à l'angle de réflexion EIA. En effet, IE étant la normale à la surface du mercure, cette droite est perpendiculaire à AH, le triangle AIE est isocèle, et les angles AIE et AEI sont égaux; mais, les deux rayons lumineux AE et IE'

1. *Bain pelliculaire de M. Périgaud.* — Un moyen de réaliser, pour cette expérience, un bain de mercure à surface plane et immuable, c'est d'employer le *bain pelliculaire* de M. Périgaud (fig. 332).

Le bain pelliculaire se compose d'un plateau en fonte de fer, RR, *séparé de son rebord par une gorge d'une épaisseur de 4 à 5 mm* (fig. 332), communiquant par un tuyau à un cylindre P, contenant du mercure qui peut être refoulé sur le plateau à l'aide d'un piston plongeur. Tout l'appareil est supporté par trois vis calantes *permettant de rendre le plateau sensiblement horizontal.*

Fig. 332.

Pour se servir du bain, on commence par bien nettoyer le plateau et le rendre horizontal, puis on fait tourner la vis qui porte le piston de manière à refouler le liquide. Le mercure jaillissant emplit d'abord la gorge et s'étale ensuite sur le plateau. Pour que le plateau soit entièrement couvert, il faut tourner, par exemple, de 4 tours de la vis; on peut alors — expérience curieuse — faire rentrer le mercure dans le réservoir en détournant la vis de 3 tours et quart *sans que le miroir se déforme, sans que l'horizontalité soit altérée.* Il ne reste plus sur le plateau qu'une très mince couche de métal. L'épaisseur, qui était d'abord de 3 mm, est réduite à environ $\frac{3}{4}$ mm. A ce moment, les images des objets apparaissent beaucoup plus brillantes et plus nettes, malgré les trépidations du sol.

Si on vient *à dépasser cette limite de* $\frac{3}{4}$ *mm*, on voit le miroir se briser *comme le ferait un ressort ou une membrane* trop tendue.

étant parallèles à cause de la grande distance de l'étoile, les angles AEI et EIE′ sont égaux comme alternes-internes : donc EIE′ = EIA.

349. **Réflexion irrégulière** ou **Diffusion**. — La quantité de lumière réfléchie régulièrement, d'après les lois précédentes, est loin de représenter la totalité de la lumière incidente. Celle-ci se partage en deux parties lorsqu'elle tombe sur une surface plus ou moins imparfaitement polie : une portion est réfléchie régulièrement, suivant les lois précédentes; une autre portion est renvoyée, éparpillée dans toutes les directions : on dit qu'elle est *réfléchie irrégulièrement* ou *diffusée*.

La lumière réfléchie irrégulièrement se désigne sous le nom de *lumière diffuse*; c'est grâce à elle que nous voyons les corps éclairés.

350. **Pouvoirs réflecteurs et diffusifs.** — La lumière se réfléchit *régulièrement* d'après les mêmes lois que la *chaleur rayonnante*, et dans la même proportion. Les *pouvoirs réflecteurs* pour la lumière (c'est-à-dire le rapport de l'intensité du faisceau réfléchi à celle du faisceau incident) sont donc les mêmes que pour la chaleur, et ils varient, de la même manière, avec *l'angle d'incidence* ainsi, pour le verre et les substances transparentes, le pouvoir réflecteur varie depuis 0,05 pour l'incidence de 20°, jusqu'à 0,546 pour l'incidence de 80°. La concordance est la même entre les deux pouvoirs réflecteurs (calorifiques et lumineux) des substances métalliques polies.

Fig. 333.

Quant à la proportion de *lumière diffuse*, elle ne varie pas seulement avec le *degré de poli* de la surface diffusante, mais avec la nature du corps, avec sa couleur et avec *l'angle des rayons incidents*. Ce sont les surfaces *mates* qui diffusent le plus, et en particulier les surfaces *d'un blanc mat*. L'éclat d'une feuille de papier *blanc* est d'autant plus vif que la surface est éclairée plus normalement. Si l'on se place pour regarder la feuille dans des directions de plus en plus obliques, on voit s'affaiblir sensiblement son éclat, ce qui prouve une diminution correspondante dans la proportion des rayons diffusés. En revanche, la proportion des rayons réfléchis augmente dans le même rapport, et si l'on dispose une flamme de bougie très près de la feuille (fig. 333), et qu'on regarde celle-ci sous une incidence rasante, on peut y distinguer une image renversée de la flamme, *comme* si la feuille avait une surface polie.

351. **Miroirs.** — On nomme miroir toute surface polie qui ré-

fléchit régulièrement la lumière en reproduisant l'image des objets éclairés qu'on lui présente. Suivant la forme de ces surfaces, on a des *miroirs plans, concaves, convexes, sphériques, paraboliques, coniques*, etc.

On appelle *miroir plan* toute surface plane aussi bien polie que possible. Le *bain pelliculaire de mercure* (548) constitue un miroir plan parfait. Nous prendrons comme types de miroirs plans des plans de bronze parfaitement polis : on les appelle *miroirs métalliques*.

552. **Formation des images par les miroirs plans.** — 1° *Cas d'un point lumineux.* — Soit un point unique A, lumineux ou éclairé, placé devant un miroir plan MN (fig. 334). Soit AN la normale au miroir; prenons pour plan de la figure un plan passant par AN : c'est un plan normal au miroir, et qui en coupe la surface suivant MN. Ce plan étant évidemment un plan de symétrie de la figure, nous n'avons à considérer que ce qui se passe dans ce plan, et toutes les constructions seront planes.

Fig. 334.

Un rayon AB, rencontrant le miroir, s'y réfléchit suivant la direction BO, en faisant l'angle de réflexion DBO égal à l'angle d'incidence ABD. Prolongeons le rayon OB jusqu'à ce qu'il rencontre en un point *a* le prolongement de la normale AN : on forme deux triangles ABN et *a*BN, qui sont égaux, comme ayant un côté commun BN compris entre deux angles égaux (ANB = *a*NB = 90° ; ABN = *a*BN = OBM). De là il résulte que *a*N est égal à AN : donc un rayon quelconque AB prend, après la réflexion, une direction telle, que son prolongement vienne couper la perpendiculaire A*a* en un point *a*, symétrique de A par rapport au miroir. Cette propriété s'applique évidemment à tout autre rayon AC : donc tous les rayons émis par le point A, et réfléchis sur le miroir, suivent, *après la réflexion*, la même direction que s'ils venaient tous du point *a*. Or, *l'œil voyant toujours un point lumineux aux points de divergence des faisceaux lumineux qu'il perçoit*, le point *a* lui apparaît comme s'il était réellement lumineux : c'est ce qu'on appelle l'*image* du point A. Cette image est dite *virtuelle*, parce qu'elle n'existe pas réellement dans l'espace; elle n'est que le point de concours *virtuel* des prolongements géométriques des rayons lumineux *réfléchis*.

Ainsi, *tout miroir* plan *donne une image virtuelle d'un point lumineux placé devant lui, qui est symétrique du point par rapport au plan du miroir.*

2° *Cas d'un objet lumineux.* — Il est évident qu'on obtiendra l'image d'un objet lumineux quelconque en construisant, d'après la règle ci-dessus, l'image de chacun de ses points, ou du moins de ceux qui suffisent pour en déterminer la position et la forme.

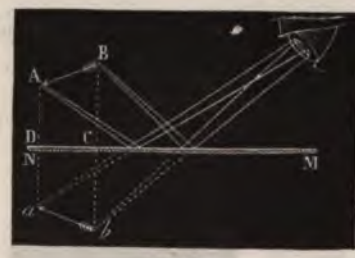


Fig. 335.

La figure 335 représente la construction de l'image *ab* d'une flèche AB.

On voit que les miroirs plans *donnent une image de même grandeur que l'objet*; car, si l'on rabat le trapèze ABCD sur le trapèze CD*ab*, on constate qu'ils coïncident et que l'objet AB se confond avec son image.

Il en résulte encore que l'image est *symétrique* de l'objet, c'est-à-dire que tous leurs points sont situés deux à deux sur une même perpendiculaire au miroir et à égale distance de part et d'autre.

Fig. 336.

Remarque. — On voit, en outre, la marche des rayons émis par chaque extrémité A, B, réfléchis sur le miroir, puis reçus dans l'œil d'un observateur.

353. Champ d'un miroir plan. — Soit un point lumineux O placé devant un miroir MN, qui en donne une image O' (fig. 336). Tous les rayons lumineux qui contribuent à la formation de cette image sont compris dans un cône ayant pour sommet le point O et pour base la surface MN. Le cône ayant même base et l'image O' pour sommet est le lieu géométrique des rayons réfléchis qui proviennent du point lumineux. C'est dans cet espace qu'on doit placer l'œil pour apercevoir l'image du point lumineux : on le définit quelquefois le *champ* du miroir, *par rapport à ce point.*

Mais le champ d'un miroir doit se définir plutôt *la partie de l'espace qui est visible* pour l'observateur dans une position

donnée. Si l'œil est en O, on voit que le champ est défini par le cône $O'MM_1N_1N$, car tout rayon incident compris dans cet espace aura un angle d'incidence intermédiaire entre ceux des rayons extrêmes MM_1 et NN_1, et se réfléchira nécessairement de manière à passer par le point O.

354. Images virtuelles et images réelles. — Il y a deux cas à distinguer dans la réflexion par les miroirs plans : le faisceau réfléchi peut être *divergent* ou *convergent*. Dans le premier cas, les rayons réfléchis ne se rencontrent pas; mais leurs prolongements concourent en un même point : ils forment alors une *image virtuelle* (fig. 334 et 335). Dans le second cas, les rayons réfléchis sont convergents et ils vont concourir vers un point situé en avant du miroir et du même côté que l'objet. Là ils forment une image à laquelle on donne le nom d'*image réelle*, pour exprimer qu'elle existe réellement; car elle peut être reçue sur un écran.

Les images réelles sont ordinairement obtenues à l'aide des miroirs concaves ou des lentilles convergentes. Mais les miroirs plans peuvent aussi donner des images *réelles*. On réaliserait ce cas en interposant un miroir plan MN (fig. 336) sur le trajet d'un faisceau convergent vers le point O' : ce faisceau, arrêté dans sa propagation par le miroir, serait rejeté en avant et réfléchi de manière à venir converger vers le point O. C'est donc ce point O qui serait une *image réelle*, tandis que le point O', n'étant que le point de concours géométrique des rayons prolongés au delà du miroir, ne serait qu'un *point lumineux virtuel*.

355. Miroirs étamés. — Images multiples. — Les miroirs métalliques n'ont qu'*une seule* surface réfléchissante et ne produisent qu'*une seule image*. Il n'en est plus ainsi des miroirs de verre étamé; ceux-ci présentent : 1° une surface antérieure en verre MN (fig. 337) où se réfléchissent d'abord les rayons incidents; 2° une couche d'amalgame métallique, ou *tain*, qui recouvre la face postérieure. La première surface donne du point A une première image *a*, formée par le prolongement des rayons réfléchis tels que *bE*; l'autre partie pénètre dans le verre, se réfléchit en *c* sur la couche de tain, revient à l'œil suivant la direction *d*H, et donne l'image *a'*. Celle-ci est distante de la première du double de l'épaisseur du miroir et est beaucoup plus intense, parce que les métaux polis ont un pouvoir réflecteur beaucoup plus grand que le verre.

Fig. 337.

Il y a encore d'autres images qui résultent des réflexions que la *lumière subit successivement* à la surface interne des *faces supérieure et inférieure du miroir*. D'ailleurs, chacune de ces réflexions

étant accompagnée de réfraction et de diffusion, il y a une perte de lumière considérable qui affaiblit les images et finit par les rendre invisibles. On aperçoit (fig. 338) les images multiples d'une bougie quand on regarde obliquement la face réfléchissante d'une lame de verre à faces parallèles, qui constitue un miroir analogue à un miroir étamé.

Fig. 338.

356. Images multiples données par deux miroirs inclinés. — Lorsqu'un objet est placé entre deux miroirs dont les plans se coupent sous un angle plus ou moins aigu, on voit des images multiples, dont le nombre augmente avec l'inclinaison des miroirs.

Par exemple, si les miroirs sont *perpendiculaires* l'un à l'autre, on aperçoit trois images (fig. 339) du point O : à savoir O′ et O″, qui proviennent de rayons tels que OC et OD, ayant subi une seule réflexion; et O‴, qui provient de rayons tels que OA, ayant subi deux réflexions, en A et en B. Les quatre points lumineux O, O′, O″ et O‴ forment les sommets d'un rectangle dont le plan est perpendiculaire à l'intersection des deux miroirs et a son centre sur cette intersection.

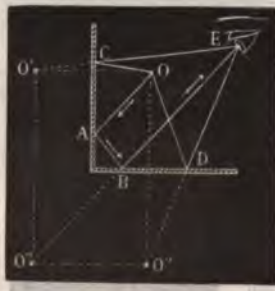


Fig. 339.

Si l'angle des miroirs est de 60°, il se forme *cinq* images; s'il est de 45°, il s'en produit *sept* (fig. 340). Le nombre des images continue ainsi à croître à mesure que l'angle diminue.

Si l'angle des miroirs n'est pas une partie aliquote de la circonférence, on a de même une série d'images situées sur une circonférence perpendiculaire à l'intersection des deux miroirs et ayant son centre sur cette intersection. Les images virtuelles,

dues à chaque miroir, deviennent des objets lumineux par rapport à l'autre miroir jusqu'à ce que ces images tombent dans l'angle formé par les prolongements eux-mêmes des miroirs (telle est la 7e image de la figure 340). Alors elles cessent de se réfléchir dans l'un ou l'autre miroir : elles deviennent *improductives* et la série des images est close[1].

Fig. 340.

337. Kaléidoscope. — C'est sur la propriété des miroirs inclinés qu'est fondé le *kaléidoscope*, petit appareil imaginé

Fig. 341.

1. Voir Annales *de chimie et de physique*, 3e série, tome XXIX : Sur les *miroirs inclinés, par* Bertin.

par Brewster. Il est formé d'un tube de carton dans lequel sont deux miroirs inclinés à 45°, ou trois miroirs inclinés à 60°. De menus objets de forme irrégulière, tels que des fragments de verre coloré, de mousse ou de dentelle, sont placés à l'une des extrémités, entre deux disques de verre, l'un transparent et l'autre dépoli. Lorsqu'on regarde par l'autre bout, on aperçoit ces objets et leurs images, symétriquement disposés, ce qui donne un ensemble très varié et plus ou moins curieux (fig. 341).

358. Images multiples données par deux miroirs parallèles. — Dans le cas de deux miroirs parallèles, le nombre des images des objets placés entre eux est *théoriquement infini*. Physiquement, ce nombre est limité, parce que, la lumière incidente ne se réfléchissant jamais en totalité, les images perdent de plus en plus de leur éclat et finissent par s'éteindre tout à fait.

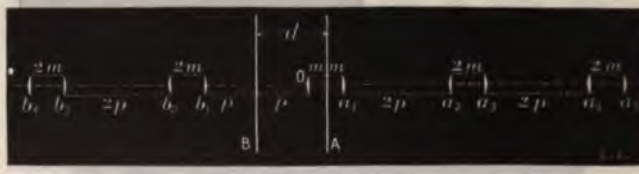


Fig. 342.

Dans le cas d'un objet O possédant une face et un revers fig. 342), la construction ordinaire des images donne derrière chaque miroir une série d'images virtuelles en ligne droite, parallèles entre elles et tournées deux à deux en sens contraires. Si d est l'éloignement des deux miroirs, m et p la distance de l'objet aux miroirs A et B, il est facile de voir que : 1° deux images consécutives qui se regardent sont distantes de $2\,m$; 2° deux images opposées consécutives sont distantes de $2\,p$; 3° deux images consécutives qui sont dans la même position sont distantes de $2\,d$.

359. **Problème du miroir tournant.** — Lorsqu'on fait tourner un miroir M d'un angle θ autour d'un axe O situé dans son plan (fig. 343), l'image d'un point lumineux A subit un déplacement angulaire *double* de celui du miroir, et il en est de même d'un rayon réfléchi IR quelconque.

En effet, du point O comme centre, avec un rayon égal à OA, décrivons un cercle, qui servira à apprécier facilement les déplacements angulaires. Les images A' et A'_1 sont symétriques du point A par rapport aux deux positions M et M_1 du miroir. Or, l'angle des deux normales A'M' est évidemment égal à θ, et comme c'est un angle inscrit, qui a pour mesure la moitié de l'arc A'_1A_1, il s'ensuit que cet arc est égal à 2θ.

Considérons maintenant un rayon quelconque AI, qui se réfléchit en IR, dans la première position du miroir. Quand celui-ci vient en M_1, le même rayon

tombe en I_1, et se réfléchit suivant $A'_1 I_1 R_1$. L'angle dont on a tourné le rayon réfléchi est $\Delta = R_1 C R$. Or, dans le triangle $C I I_1$, l'angle extérieur $I I_1 R_1$ donne

$$2 i_1 = 2 i + \Delta,$$

d'où

$$\Delta = 2 (i_1 - i);$$

et dans le triangle $D I I_1$, on a l'angle extérieur

$$i_1 = i + \theta,$$

d'où

$$i_1 - i = \theta,$$

donc

$$\Delta = 2 \theta.$$

Fig. 343.

Ce fait est le principe de la *méthode de Poggendorff* pour la mesure des petits angles, ainsi qu'au *sextant* et au *cercle répétiteur à réflexion* de Borda, deux instruments qui servent en mer à mesurer la distance de deux points.

360. **Applications des miroirs.** — On connaît les applications des miroirs plans dans l'économie domestique. Ces miroirs sont aussi d'un fréquent usage dans plusieurs appareils de physique, pour donner à la lumière une direction déterminée.

Héliostat. — Si c'est la lumière solaire qu'on veut ainsi diriger, on ne peut conserver aux rayons réfléchis une direction constante qu'autant que le miroir est mobile. Il faut, en effet, donner à celui-ci un mouvement qui compense le changement de direction que prennent sans cesse les rayons incidents, en vertu du mouvement apparent du soleil. Ce résultat s'obtient à l'aide d'un mouvement d'horlogerie qui fait varier l'inclinaison du miroir au moyen d'une tige à laquelle celui-ci est fixé. L'appareil ainsi construit a reçu le nom d'*héliostat*.

Goniomètre. — La réflexion de la lumière a encore été utilisée par Wollaston pour mesurer les angles des cristaux avec une grande précision, au moyen d'instruments connus sous le nom de *goniomètres à réflexion*. Nous parlerons de cette méthode à propos de la mesure des indices de réfraction.

MIROIRS COURBES.

361. **Miroirs sphériques. — Définitions.** — On a déjà vu (351) qu'on distingue plusieurs sortes de miroirs courbes; les plus fréquemment employés sont les *miroirs sphériques* et les *miroirs paraboliques*.

On appelle *miroirs sphériques* ceux dont la surface est une portion ou *calotte* de sphère. Suivant qu'on en polit la face interne ou la face externe, on a un miroir *concave* ou *convexe*. Le centre C de la sphère dont le miroir fait partie (fig. 344) en est le centre *de courbure; le point A, milieu de l'arc* MN, en est le sommet. La

droite indéfinie AL, menée par les points A et C, est l'*axe principal* du miroir; toute droite qui passe par le centre C sans passer par le point A est un *axe secondaire*.

On nomme *section principale* du miroir toute section plane qui passe par l'axe principal. Enfin, l'*ouverture* d'un miroir est l'angle au centre MCN, sous-tendu par une section principale.

Fig. 344.

L'application des lois de la réflexion aux miroirs courbes se fait aisément en considérant leur surface comme formée d'une infinité d'*éléments* plans, infiniment petits. La *normale* à la surface courbe, en un point donné, est alors la perpendiculaire à l'élément correspondant ou, ce qui est la même chose, au plan tangent qui le contient : dans le cas des miroirs sphériques, la normale en un point est donc simplement le *rayon* géométrique de ce point.

362. **Miroirs concaves. — Étude géométrique et expérimentale (Cas des rayons centraux.)** — Cette étude est fondée sur l'application des lois de la réflexion à des miroirs de *petite ouverture*, c'est-à-dire dont l'angle au centre ne dépasse pas 8 ou 9 degrés, et n'admettant que des *rayons centraux*, c'est-à-dire des rayons parallèles à l'axe principal ou très peu inclinés et très voisins de cet axe.

Lorsque l'objet lumineux est symétriquement placé par rapport à l'axe principal, tous les phénomènes sont eux-mêmes symétriques par rapport à l'une des sections principales. Cela permet de simplifier les constructions relatives à la détermination des images en les réduisant, dans tous les cas, *à des constructions planes*, faites dans le plan de la section principale.

363. **Définition des foyers.** — *L'expérience prouve* qu'un miroir concave donne, d'un objet lumineux placé devant lui, une image nette (réelle ou virtuelle). On doit en conclure qu'à chaque point lumineux de l'objet correspond un point lumineux *unique* dans l'image; ce dernier est soit le point de concours de tous les rayons réfléchis qui proviennent d'un même point lumineux, soit le point de concours de leurs prolongements : dans le premier cas, on l'appelle *foyer réel*, et dans le deuxième cas *foyer virtuel*.

364. **Foyer principal. — Définition et détermination.** —

Lorsqu'un faisceau lumineux tombe sur un miroir concave sphérique parallèlement à l'axe principal, *tous les rayons vont, après la réflexion, sensiblement concourir en un même point* F *situé à égale distance du centre de courbure et du miroir* : c'est le *foyer principal* ; il est toujours *réel*.

En effet, soit un faisceau de rayons parallèles à l'axe principal (fig. 346) et soit SI un de ces rayons (fig. 345). Ce rayon se réfléchit, sur l'élément qui correspond au point I, de manière que l'angle de réflexion CIF soit égal à l'angle d'incidence SIC et situé dans la même section principale. Par suite, dans le triangle IFC, les côtés IF et CF sont égaux comme opposés à des angles égaux ; car les angles ICF et FIC sont tous deux égaux à l'angle SIC, le premier comme alterne-interne, le second d'après les lois de la réflexion. D'ailleurs FI est d'autant plus près d'égaler FO que l'arc OI est plus petit, et dans les miroirs de

Fig. 345. Fig. 346.

petite ouverture on peut admettre que *les droites* FI *et* FO *sont rigoureusement égales, et que le point* F *est le milieu de* OC. Le même raisonnement s'applique à tout autre rayon $S_1 I_1$ du faisceau (fig. 346).

Cette propriété du foyer principal en indique la construction : on n'a qu'à prendre FO = FC. La distance FO est la *distance focale principale*. On la désigne par f ; en appelant R le rayon de courbure du miroir, on a $f = \frac{1}{2}$ R.

Réciproque. — Si l'on suppose en F un point lumineux, les rayons émis par ce point prennent, après la réflexion, des directions IS, $I_1 S_1$, parallèles à l'axe principal (fig. 346). En effet, les angles de réflexion deviennent des angles d'incidence, et inversement, mais ces angles restent toujours égaux. Donc, un point lumineux étant placé au foyer principal d'un miroir concave, le *faisceau divergent* parti de ce point est transformé, par réflexion sur le *miroir, en un faisceau parallèle à l'axe*.

La figure 346 montre comment un faisceau parallèle SIS_1I_1 est transformé par la réflexion en un faisceau convergent II_1F; et comment, inversement, un faisceau divergent FII_1 est transformé en un faisceau parallèle ISI_1S_1.

365. **Cas des points lumineux. — Foyers conjugués.** — On appelle *foyers conjugués* tout point lumineux et son image. Les foyers conjugués peuvent être, l'un ou l'autre, *réels* ou *virtuels*. Voici comment on les détermine.

I. *Point lumineux situé sur l'axe principal.* — Supposons le point L (fig. 347) au delà du foyer principal et à une distance *finie* : les rayons incidents ne sont plus parallèles, mais divergents. Le foyer conjugué *l* étant le point de concours de tous les rayons réfléchis, il suffit de construire deux de ces rayons. Remarquons d'abord que le rayon émis par L, suivant l'axe principal LA, est réfléchi suivant la même direction, puisqu'il est normal au miroir (fig. 347). Il suffit alors de mener un autre rayon incident tel que LI, la normale IC, puis le rayon réfléchi I*l* faisant un angle CIL = LKC (fig. 348) : le point de rencontre *l* avec l'axe principal est le foyer conjugué cherché.

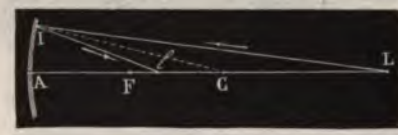


Fig. 347.

Remarques. — 1° Les deux points L et *l* sont *réciproques* l'un de l'autre, c'est-à-dire que, si le point lumineux était transporté en

Fig. 348.

l, son foyer conjugué serait en L, *I*K devenant le rayon incident et KL le rayon réfléchi.

2° Lorsque le point L s'approche ou s'éloigne du centre C, son foyer conjugué s'en approche ou s'en éloigne avec lui (fig. 348); *car les angles d'incidence et de réflexion croissent ou décroissent en même temps.*

3° Si L vient à coïncider avec le centre C, l'angle d'incidence est nul, et comme il en doit être de même de l'angle de réflexion, le rayon incident revient sur lui-même : *le foyer coïncide avec le point lumineux* (fig. 348).

4° Lorsque celui-ci passe en deçà du centre C, entre ce point et le foyer principal, le foyer conjugué passe de l'autre côté du centre, et il s'en éloigne à mesure que le point lumineux se rapproche du foyer principal.

5° Si le point lumineux vient coïncider avec le foyer principal, les rayons sont réfléchis parallèlement à l'axe et ne se rencontrent plus, et, par conséquent, *il n'y a plus de foyer conjugué*. On exprime quelquefois ce fait en disant que *le foyer est rejeté à l'infini sur l'axe principal*.

6° *Foyer virtuel*. — Supposons enfin le point lumineux placé (fig. 349) entre le foyer principal et le miroir. Un rayon quelconque LM fait alors avec la normale CM un angle d'incidence LMC plus grand que FMC; l'angle de réflexion doit donc être plus grand que l'angle CMS. Il s'ensuit que le rayon réfléchi ME est divergent par rapport à l'axe AK. La même chose ayant lieu pour tous les rayons émis du point L, les rayons réfléchis eux-mêmes ne se rencontrent pas, mais leurs prolongements vont concourir en un même point *l* situé sur l'axe derrière le miroir : ce point lumineux *virtuel* est le foyer conjugué du point lumineux réel.

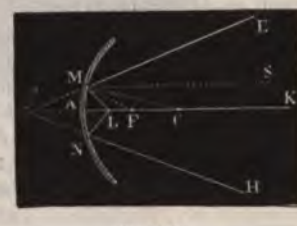


Fig. 349.

II. *Point lumineux situé en dehors de l'axe principal*. — Son

Fig. 350.

foyer conjugué est, comme précédemment, le point de concours de tous les rayons réfléchis. Il suffit d'en construire deux : on *choisira les plus commodes*.

Le rayon lumineux LC (fig. 350), qui passe par le centre de courbure, tombe normalement sur le miroir et se réfléchit suivant sa propre direction. L'image est donc sur cette ligne, qui joue ainsi, par rapport au point lumineux, le même rôle que l'axe principal dans le cas précédent : c'est pourquoi on l'appelle *axe secondaire* du point L. Si maintenant on mène le rayon LI parallèle à l'axe principal, son rayon réfléchi doit passer par le foyer principal (364) et on l'obtient immédiatement en menant la droite IF; celle-ci, prolongée, va couper l'axe secondaire LC en un point *l* qui est évidemment le foyer conjugué cherché.

Remarque. — Ce foyer conjugué peut être *réel* ou *virtuel*, suivant la position du point conjugué par rapport au plan du foyer principal.

III. *Détermination expérimentale des foyers.* — 1° *Foyer principal.* — On reçoit sur le miroir un faisceau solaire, dans une direction parallèle à l'axe principal, et l'on cherche, avec un écran de verre dépoli ou de carton, le lieu où la lumière réfléchie se concentre avec le plus d'éclat : c'est là que se trouve le *foyer principal.*

2° *Foyers conjugués.* — Les foyers conjugués se déterminent de même en plaçant une bougie allumée au point dont on veut avoir le foyer, et en cherchant le lieu où le sommet du faisceau réfléchi présente le maximum d'éclat.

366. **Cas d'objets lumineux : Construction des images.** — Un objet lumineux quelconque étant composé de points lumineux,

Fig. 351.

on construira l'image par points, dans tous les cas, en appliquant les règles précédentes.

1° *Objet situé au delà du centre.* — Soit un objet AB, placé devant un miroir concave perpendiculairement à l'axe principal (fig. 351). En appliquant les constructions précédentes, on trouvera en *a*, sur l'axe secondaire AE, l'image du point A. De même, le point B va former son image en b sur l'axe secondaire de ce point. On a donc en *ab* l'image de AB. Cette image est réelle, ren-

versée, placée entre le centre de courbure et le foyer principal : elle est d'autant plus petite par rapport à l'objet que celui-ci est plus éloigné.

2° *Objet situé en deçà du centre.* — *Réciproquement*, si l'objet était placé en *ab* (fig. 351), entre le foyer principal et le centre, son image se formerait en AB. Elle serait encore *réelle et renversée*, mais *plus grande que l'objet*, et d'autant plus grande que *ab* serait plus près du foyer principal. La figure 356 montre l'image *réelle* d'une flamme de bougie.

3° *Objet situé dans le plan focal principal.* — Il ne se produit alors aucune image (fig. 352). En effet, le faisceau des rayons tels

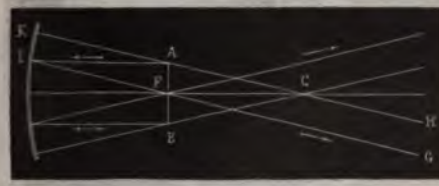


Fig. 352.

que AI et AK, venus du point A, donne après la réflexion un faisceau KIGH parallèle à l'axe secondaire CK, et les rayons émis du point B un faisceau parallèle à BC (364, réciproque) : ces faisceaux ne peuvent donc former ni foyers ni images, et les foyers conjugués de chacun des points de l'objet sont *rejetés à l'infini*, chacun dans la direction de son axe secondaire.

4° *Objet situé en deçà du plan focal principal.* — Soit AB l'objet (fig. 353) : traçons d'abord l'axe secondaire du point CA ; puis menons le rayon AD parallèle à l'axe principal qui se réfléchit suivant DF. Or, ce rayon réfléchi doit couper l'axe secondaire *en arrière* du miroir, en *a*, et non en avant, car la figure DAFC est un tra-

Fig. 353.

pèze, dont AD est la petite base, puisque AD est plus petit que la moitié du rayon. De même le rayon mené du point B parallè*lement à l'axe donne en b l'image* du point B. L'œil qui reçoit

le faisceau réfléchi voit donc en *ab* une image de AB, *virtuelle*,

Fig. 354.

droite et *plus grande que l'objet*. La figure 354 montre l'image virtuelle d'une flamme de bougie.

Remarques. – 1° Lorsque l'objet *ab* a tous ses points hors de

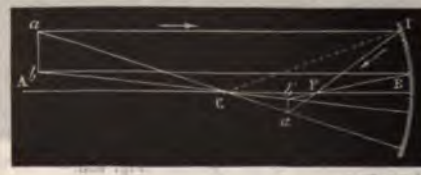


Fig. 355.

l'axe principal (fig. 355), on trouve par la construction ci-dessus *que l'image se forme en a'b'*, de l'autre côté de l'axe AB.

2° *Images aériennes.* — Il est à remarquer qu'on peut voir les images réelles de deux manières : 1° en les recevant sur un écran qui, par diffusion, les rend visibles dans toutes les directions

Fig. 356.

(fig. 356); 2° en plaçant l'œil au delà de l'image, de façon à recevoir les rayons réfléchis qui la produisent. On aperçoit alors, dans l'espace, une image qu'on désigne sous le nom d'*image aérienne.*

567. **Miroirs convexes. — Étude géométrique et expérimentale. (Cas des rayons centraux.)** — Cette étude est fondée, comme pour les miroirs concaves,

Fig. 357.

sur l'application des lois de la réflexion à des miroirs de *petite ouverture*, n'admettant que des *rayons centraux*. Toutes les constructions sont planes, comme dans les *cas précédents et pour les mêmes raisons.* — Les miroirs convexes ne

donnent que des *foyers virtuels* quand les points lumineux sont *réels*, — ce qui est le cas général. Mais ils peuvent donner, comme les miroirs plans, des images *réelles*, dans le cas particulier de faisceaux incidents qui convergeraient vers des points lumineux *virtuels*.

1° *Foyer principal.* — Soient d'abord les rayons SI, TK... (fig. 357) parallèles à l'axe principal d'un miroir convexe. Ces rayons, après leur réflexion, prennent des directions divergentes IM, KH,... qui, prolongées, vont concourir en un point F, qui est un *foyer virtuel* : c'est le *foyer principal* du miroir. En considérant le triangle CKF, qui est isocèle, on démontrerait, comme pour les miroirs concaves, que F est le milieu de CA.

2° *Foyers conjugués.* — Si les rayons partent d'un point L, situé sur l'axe, à une distance finie, le foyer conjugué est encore *virtuel*; il vient se faire en *l*, *entre le foyer principal* F *et le miroir*. Lorsque le point lumineux se déplace, sur l'axe principal, depuis l'infini jusqu'au sommet A, son foyer conjugué, *toujours virtuel*, se déplace depuis le foyer principal F jusqu'au sommet A.

3° *Détermination expérimentale du foyer principal.* — On recouvre le miroir d'une feuille de papier, en ayant soin de réserver dans celle-ci, à égale distance du centre de figure A, et dans une même section principale (fig. 358), deux petits trous en H et en I, qui laissent le miroir à nu. On place ensuite devant le miroir un écran MN, percé à son centre d'une ouverture circulaire plus grande que la distance HI. Si l'on reçoit sur le miroir un faisceau de rayons solaires SHS' I, parallèles à l'axe, la lumière se réfléchit en H et en I sur les points où le miroir est à découvert, et va former deux traces brillantes en *h* et en *i* sur l'écran. En reculant celui-ci, ou en l'approchant, on trouve une position pour laquelle $hi = 2\,HI$: *la distance* AD *de l'écran au miroir représente alors la distance focale principale.*

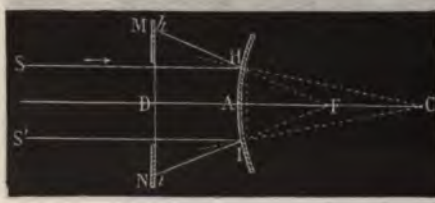


Fig. 358.

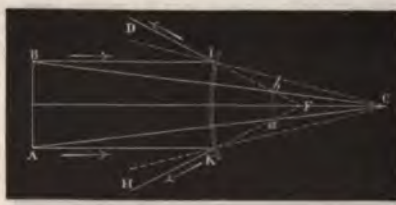


Fig. 359.

En effet, le petit arc HAI se confondant sensiblement avec sa corde, les triangles semblables FHI et F*hi* donnent

$$\frac{HI}{hi} = \frac{FA}{FD};$$

mais, HI étant la moitié de *hi*, FA est la moitié de FD; donc AD est sensiblement égal à AF. D'ailleurs, puisque les rayons SH et S'I sont parallèles à l'axe, FA est la distance focale principale; donc AD représente bien cette distance.

4° *Construction des images.* — Soit un objet AB (fig. 359) placé à une distance *quelconque, perpendiculairement* à l'axe principal. On mène les axes *secondaires AC et BC, et les rayons* AK et BI parallèles à l'axe principal : on sait que le *prolongement du rayon réfléchi* en K doit aller passer en F; on joint donc le

point K au point F par la droite KF, qui coupe l'axe secondaire AC en un point a : c'est le foyer virtuel de A. Celui de B s'obtient de même en b. L'œil qui reçoit les rayons réfléchis ID et KH voit en ab l'image de AB, *image virtuelle, droite et plus petite que l'objet.*

5° **Application** : *Globe périscopique.* — Les dimensions de l'image sont d'autant moindres que l'objet est plus éloigné du miroir. Si donc toutes les parties de l'objet ne sont pas sensiblement à la même distance, ce qui a lieu soit quand l'objet n'est pas symétrique par rapport à l'axe principal, soit quand les rayons lumineux qu'il envoie de ses différents points sont les uns centraux, les autres périphériques, on observera une déformation plus ou moins accusée de l'image. C'est ce qu'on observe dans le *globe périscopique* (fig. 360).

Fig. 360.

C'est un miroir convexe en verre noir ou en verre étamé, analogue à ceux qu'on place dans les jardins et qui reflètent, en les déformant, le paysage et les objets environnants.

368. **Formules des miroirs sphériques concaves de petite ouverture.** — 1° *Équation aux foyers conjugués.* — On appelle ainsi la relation qui existe entre la distance d'un point lumineux au sommet du miroir et celle de son image. Considérons un miroir concave MN; soient R son rayon de courbure, p la distance *LA du point lumineux L* au miroir (fig. 361) et p' la dis-

Fig. 361.

tance lA de l'image. Dans le triangle LMl, la normale MC partageant l'angle LMl en deux parties égales, on a, d'après le *théorème de la bissectrice*,

$$\frac{Cl}{CL} = \frac{lM}{LM}, \quad \text{d'où} \quad Cl \times LM = CL \times lM.$$

Or, si l'arc AM ne dépasse pas 8 à 9 degrés, les lignes ML et Ml sont très sensiblement égales à AL et Al, c'est-à-dire à p et à p'. D'ailleurs

$$Cl = CA - Al = R - p' \quad \text{et} \quad CL = AL - AC = p - R.$$

Substituant ces diverses valeurs dans l'égalité qui précède, on obtient

$$(R - p')\,p = (p - R)\,p', \quad \text{ou} \quad Rp - pp' = pp' - Rp';$$

transposant et réduisant, on trouve

$$Rp + Rp' = 2pp'.$$

Si l'on divise tous les termes de cette égalité par le produit $pp'R$, et qu'on supprime les facteurs communs, elle devient

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{R},$$

et comme on a

$$f = \frac{R}{2}, \quad \text{d'où} \quad \frac{1}{f} = \frac{2}{R},$$

l'équation prend la forme

$$[1] \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

Telle est la forme ordinaire de l'*équation aux foyers conjugués*, qu'on appelle aussi *formule des miroirs concaves*.

Remarque. — En résolvant l'équation [1] par rapport à p', on en tire

$$[2] \qquad p' = \frac{pf}{p - f} \quad \text{ou bien} \quad \frac{f}{1 - \frac{f}{p}}, \qquad [2\ bis]$$

formule qui fait connaître la distance de l'image au miroir quand on connaît celle du point lumineux et le rayon de courbure.

369. **Discussion de la formule des miroirs concaves.** — Cherchons maintenant les différentes valeurs que prend p' suivant celles qu'on donne à p.

I. $p = \infty$, c'est-à-dire que *le point lumineux est placé sur l'axe principal à une distance infinie.*

En introduisant cette valeur de p dans la formule [2], il vient $p' = f$: cela veut dire que *l'image se fait au foyer principal*; ce qui devait être, puisque les rayons incidents forment alors un faisceau parallèle à l'axe.

II. p *décroît*, c'est-à-dire que *le point lumineux se rapproche du miroir.*

Alors le dénominateur de la formule [2] diminue et la valeur de p' augmente par conséquent, l'image s'approche du centre en même temps que l'objet. Elle reste d'ailleurs comprise entre le foyer principal et le centre tant que p est $> R$, car pour une valeur de p égale à $2f + \varepsilon$ on a à la fois

$$\frac{f}{1 - \frac{f}{p}} > f \quad \text{et} \quad < 2f.$$

III. $p = R = 2f$, c'est-à-dire que *le point lumineux coïncide avec le centre.*

En faisant $p = 2f$ dans la formule [2 *bis*], elle donne $p' = 2f$, c'est-à-dire que *l'image coïncide avec le point lumineux.*

IV. $p < 2f$, c'est-à-dire que *le point lumineux est entre le centre et le foyer principal.*

La formule [2 *bis*] montre que p' est $> 2f$, c'est-à-dire que *l'image se fait alors de l'autre côté du centre.*

V. $p = f$, c'est-à-dire que *le point est au foyer principal.*

La formule donne $p' = \frac{R}{0} = \infty$, c'est-à-dire que *l'image est rejetée à l'infini.*

En effet, les rayons réfléchis sont alors parallèles à l'axe.

VI. $p < f$, c'est-à-dire que *le point lumineux est entre le foyer principal et le miroir.*

Le dénominateur de la formule [2] étant alors négatif, il en est de même de p', ce qui indique que la formule ne convient pas à ce cas. Cela n'est pas étonnant, puisqu'on l'avait établie en supposant qu'il existait une image réelle. Or, si l'on recommençait le même calcul en faisant la supposition inverse, c'est-à-dire en admettant l'existence d'une image virtuelle, on trouverait l'équation aux foyers conjugués sous la forme suivante,

$$[1\ bis] \qquad \frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f},$$

d'où l'on tirerait la formule

$$p' = \frac{pf}{f - p}.$$

Celle-ci, pour toutes les valeurs de p inférieures à f, donnerait pour p' des valeurs positives et parfaitement admissibles. Cela prouve que pour toutes les positions du point lumineux comprises entre le foyer principal et le sommet *on a une image virtuelle*, dont la distance au miroir est donnée par la formule [2 *bis*].

Remarque. — Pour représenter les divers cas qui peuvent se présenter dans la réflexion sur un miroir concave, il faut donc employer les deux équations [1] et [1 *bis*]. Toutefois on peut n'en prendre qu'une, en admettant les conventions

algébriques relatives à l'interprétation des quantités négatives. Si l'on convient d'avance que les valeurs négatives de p' correspondront aux images virtuelles, l'équation

$$[1] \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

comprendra tous les cas.

370. **Formules des miroirs convexes de petite ouverture.** — 1° *Équation aux foyers conjugués.* — Il est facile de la trouver directement, par la même méthode que pour les miroirs concaves. En se plaçant dans le cas d'une image virtuelle, on arrive à l'équation

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{2}{R} = -\frac{1}{f}$$

ou, en changeant les signes des deux membres,

$$[1] \qquad \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}.$$

Remarque. — On pourrait la déduire de l'équation fondamentale [1] en changeant de signe toutes les grandeurs géométriques qui ont changé de sens *par rapport au cas initial d'un miroir concave donnant une image réelle d'un point lumineux réel.*

Discussion. — De cette équation on déduit

$$[2] \qquad p' = \frac{pf}{p+f}.$$

En discutant la formule comme précédemment, on verrait qu'elle donne toujours une valeur admissible, quel que soit p : ce qui prouve qu'elle s'applique à tous les cas, et que *l'image d'un point lumineux réel est toujours virtuelle dans un miroir convexe.*

371. **Formule de Newton.** — On doit à Newton une forme de l'équation aux foyers conjugués, qui s'applique aussi bien au cas des miroirs convexes qu'à celui des miroirs concaves. Il suffit de prendre le foyer principal F pour origine des distances, et de poser

$$LF = \varpi \quad \text{et} \quad lF = \varpi' \text{ (fig. 347).}$$

On a alors

$$p = \varpi + f \quad \text{et} \quad p' = \varpi' + f.$$

En portant ces valeurs dans l'équation [1], il vient, toutes réductions faites,

$$\varpi\varpi' = f^2.$$

372. **Cas des objets lumineux.** — 1° *Distance de l'image au miroir.* — Les équations aux foyers conjugués expriment aussi la relation qui existe entre les distances de l'objet et de son image au sommet du miroir.

2° *Grandeur de l'image.* — A l'aide des mêmes formules, on peut facilement calculer la grandeur d'une image quand on connaît la distance de l'objet, sa grandeur et le rayon du miroir. En effet, si l'on représente l'objet par BD (fig. 362), son image par bd, et si l'on suppose connus la distance $KA = p$ et le rayon $AC = 2f$, on calcule $Ao = p'$ au moyen de l'une des deux formules ci-dessus. Or, les deux triangles BCD et dCb étant semblables, on a entre leurs bases et leurs hauteurs la proportion

$$\frac{bd}{BD} = \frac{Co}{CK} = \frac{R - p'}{p - R} = \frac{p'}{p},$$

donc

$$\frac{bd}{BD} \quad \text{ou} \quad \frac{I}{O} = \frac{p'}{p} = \frac{f}{p-f}$$

373. **Cas des miroirs de grande ouverture. — Rayons marginaux; aberration de sphéricité; caustiques par réflexion.** — Lorsque l'ouverture du miroir dépasse 8 à 9 degrés, les rayons réfléchis près des bords vont rencontrer l'axe en un foyer G, plus voisin du miroir que le foyer F des rayons centraux (fig. 363). Par suite, à un point lumineux unique correspondent en réalité une série de foyers conjugués, disposés en ligne droite, sur l'axe secondaire du point, le foyer des rayons périphériques étant toujours le plus voisin du sommet. La distance entre les foyers extrêmes s'appelle *aberration longitudinale* de sphéricité.

Fig. 362.

Lorsqu'il s'agit d'un point lumineux situé sur l'axe principal, et à l'infini (fig. 363), l'aberration correspondante s'appelle *aberration principale* : c'est la distance FG. Et si l'on place un écran dans le plan focal, on aura, au lieu d'un point lumineux unique, un cercle lumineux de rayon FH. De là résulte dans les images un défaut de netteté plus ou moins grand, qui a fait rejeter l'emploi des miroirs concaves sphériques de grande ouverture et leur a fait substituer, dans la construction des instruments d'optique, les miroirs concaves *paraboliques* (fig. 365).

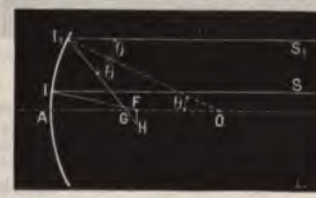


Fig. 363.

Les rayons réfléchis se coupant successivement deux à deux (fig. 364), leurs points d'intersection forment dans l'espace une surface brillante qu'on nomme *caustique par réflexion*. La courbe FM représente une des branches de la section principale de cette surface, qui est *de révolution* autour de l'axe principal.

Fig. 364.

374. **Miroirs paraboliques.** — Les *miroirs paraboliques* sont des miroirs concaves dont la surface est engendrée par la révolution d'un arc de parabole AM autour de son axe AX (fig. 365).

Or, c'est une propriété connue de la parabole qu'en un point quelconque M de cette courbe *le rayon vecteur* FM *et la droite* ML, *parallèle à l'axe*, *font avec la tangente TT' des angles égaux*. Par suite, les angles avec la normale seront *aussi égaux : donc, dans ces sortes de miroirs*, tout rayon parallèle à l'axe, te

que LM, sera réfléchi suivant MF et ira *rigoureusement* passer au foyer géométrique F du miroir. *Réciproquement*, une source de lumière étant placée en ce foyer, les rayons lumineux qui tombent sur le miroir se réfléchissent en un faisceau *rigoureusement* parallèle à l'axe. Les miroirs qui possèdent cette propriété sont appelés *aplanétiques*.

375. **Construction et emploi des miroirs aplanétiques.** — Dans ces conditions, la lumière ainsi réfléchie conserve la même intensité jusqu'à une grande distance de la source; car c'est surtout la divergence des rayons qui en affaiblit l'intensité. C'est pourquoi les miroirs paraboliques, bien que plus difficiles à construire et plus coûteux que les miroirs sphériques, leur sont-ils préférés comme *objectifs* de *télescopes*. On construit actuellement, pour cet usage, des miroirs en verre, argenté par le procédé Martin, qui sont à la fois moins lourds que les anciens miroirs en bronze, moins coûteux, plus faciles à réparer et susceptibles d'un poli plus parfait. On les fait d'abord sphériques; on les rend ensuite aplanétiques en travaillant les différentes régions par la méthode dite des *retouches locales*, due à Foucault : on sait à chaque instant de combien l'on s'écarte de la forme parabolique et dans quel sens, ce qui supprime les tâtonnements et les lenteurs de l'ancienne méthode.

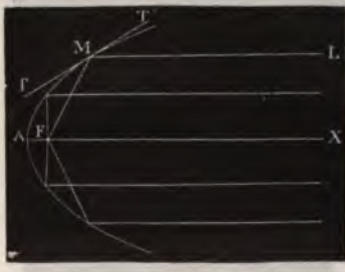


Fig. 365.

2° On emploie encore les miroirs paraboliques comme réflecteurs pour les lampes qu'on place sur les voitures publiques, ainsi que sur les trains de chemins de fer. Ces sortes de réflecteurs ont aussi longtemps servi pour les phares, mais on emploie de préférence aujourd'hui les *systèmes réfringents* (lentilles de Fresnel).

CHAPITRE IV

DIOPTRIQUE

—

LOIS DE LA RÉFRACTION SIMPLE.

376. **Définitions.** — La *réfraction* est une déviation qu'éprouvent les rayons lumineux lorsqu'ils traversent *obliquement* la surface de séparation de deux milieux transparents, tels que l'air et l'eau (*fig.* 366, I). Si les rayons tombent perpendiculairement à cette surface, ils ne subissent aucune déviation, ils continuent à se propager en ligne droite (fig. 366, II).

Soit SO un *rayon incident* et AO la normale en O à la surface de séparation des deux milieux. Prenons pour plan de la figure 367 le plan d'incidence SOA : la surface réfringente est représentée par la droite *mn*. On nomme *rayon réfracté* la direc-

(I) (II)

Fig. 366.

tion OH que prend la lumière dans le second milieu; les angles SOA et HOB, que forment ces rayons avec la normale AB, sont nommés, l'un *angle d'incidence*, et l'autre *angle de réfraction*.

La lumière qui se présente pour passer d'un milieu dans un autre ne pénètre jamais en totalité dans celui-ci : une partie se réfléchit à la surface de séparation, une autre partie s'y diffuse, et le reste seulement pénètre dans le second milieu. La réfraction d'un faisceau lumineux est donc toujours accompagnée d'une perte plus ou moins grande de lumière.

Fig. 367.

Dans les milieux non cristallisés, comme l'air, les liquides, le verre ordinaire, le rayon lumineux, *simple* à l'incidence, reste encore *simple* après la réfraction; mais dans certains corps cristallisés, comme le spath d'Islande ou le gypse, le rayon incident donne naissance à *deux rayons réfractés*. Le premier phénomène constitue la *réfraction simple*, le second la *double réfraction*. Les milieux qui ne donnent qu'un seul rayon réfracté sont appelés *monoréfringents*; les autres sont dits *biréfringents*.

477. **Lois de la réfraction simple.** — La réfraction simple a lieu d'après les deux lois suivantes :

1° *Le rayon incident et le rayon réfracté sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfringente.*

2° (Loi de Descartes). — *Quelle que soit l'obliquité du rayon incident, le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant.*

Ce nombre s'appelle *indice de réfraction* du deuxième milieu par rapport au premier.

Ces lois se vérifient principalement dans les conséquences qu'on en tire. Mais on peut les vérifier approximativement à l'aide d'un vieil appareil classique, construit par Silbermann.

Appareil de Silbermann. — Il consiste essentiellement en un cercle en cuivre, gradué, disposé verticalement sur un trépied à vis calantes (fig. 368) et muni de deux alidades en cuivre MF et OK. Ces deux alidades peuvent se mouvoir sur la face postérieure du cercle, en tournant sur un tourillon central, et peuvent parcourir librement toute la graduation, laquelle est tracée de part et d'autre du point I et va de 0° à 90°; elles portent deux tubes, semblables au tube *c*, dont les axes, dirigés rigoureusement vers le centre, servent de route aux rayons lumineux, incidents ou réfractés. Sur l'une des alidades, un miroir M, qu'on incline à volonté, permet d'envoyer le rayon incident dans la direction voulue, et sur l'autre alidade un petit écran de verre dépoli *e* permet de recevoir le rayon réfracté.

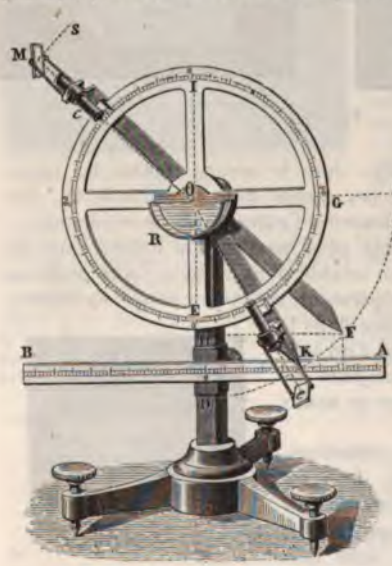


Fig. 368.

Pour vérifier les lois, on commence par fixer sur le pied de l'appareil une règle horizontale AB, divisée en millimètres, que l'on peut abaisser ou élever à volonté et qui donne des longueurs proportionnelles aux sinus des angles d'incidence et de réfraction.

Puis on place au centre du cercle un vase hémicylindrique en terre R, qu'on remplit d'eau (ou de tout autre liquide) jusqu'à ce que la surface libre coïncide avec le plan horizontal qui contient le centre du cercle[1]. On fait alors arriver un rayon lumineux SMO juste au centre du cercle gradué. Là le rayon se ré-

1. Le même appareil peut servir à la vérification directe des lois de la réflexion. *Il suffit de remplacer* le vase d'eau par un miroir plan, dont la surface est dis*posée horizontalement* dans le plan horizontal du centre. On supprime alors la *règle graduée AB*, qui devient inutile.

fracte à son entrée dans l'eau; puis il en sort, sans se réfracter de nouveau, normalement à la paroi cylindrique du vase. On le suit en tournant l'alidade K jusqu'à ce qu'une image lumineuse apparaisse au centre de l'écran *e*. L'angle KOE, que fait alors l'alidade K avec la normale IE menée au point d'incidence, est l'angle de réfraction : celui d'incidence est l'angle MOI, égal à FOE, comme opposé par le sommet.

La première loi est vérifiée par la disposition même de l'appareil. En effet, le plan du limbe qui contient les deux rayons lumineux est perpendiculaire à la surface réfringente. Maintenant, si l'on imagine que, du point O comme centre, avec le rayon OK, on décrive l'arc de cercle CD, le sinus d'incidence est proportionnel à la droite FH, menée perpendiculairement à IE prolongée, et le sinus de réfraction à la perpendiculaire abaissée de l'extrémité K sur le prolongement de la même droite IE. On évalue ces deux grandeurs successivement à l'aide de la règle AB. Leur rapport est égal au rapport $\frac{\sin i}{\sin r}$.

En déplaçant l'alidade M, on fait varier l'angle d'incidence, et l'on constate que le rapport de leurs sinus *reste constant*.

378. **Indice de réfraction, indice inverse.** — Nous avons dit que ce rapport constant est l'*indice de réfraction* du deuxième milieu par rapport au premier. Soit n cet indice, et i et r les angles d'incidence et de réfraction, on a $\frac{\sin i}{\sin r} = n$.

Lorsque l'on a $n > 1$, l'angle d'incidence est plus grand que l'angle de réfraction; il en résulte que le rayon réfracté se rapproche de la normale : on dit alors que le deuxième milieu est *plus réfringent* que le premier. Dans le cas où l'on aurait $n < 1$, le rayon réfracté s'écarterait de la normale : le deuxième milieu serait *moins réfringent* que le premier[1].

Réciproquement, si l'on considère les milieux dans un ordre inverse, c'est-à-dire si la lumière se propage de l'eau dans l'air, ou du verre dans l'air, on constate, au moyen de l'appareil ci-dessus, que les rayons suivent le même chemin, mais en sens contraire : KO devenant le rayon incident, OM devient le rayon réfracté. C'est dans ce fait que consiste ce qu'on appelle quelquefois le *principe du retour inverse des rayons lumineux*. Il en résulte que si l'indice de réfraction direct était n, l'*indice inverse* sera $\frac{1}{n}$.

379. **Phénomènes dus à la réfraction.** — Plusieurs phénomènes naturels très connus sont des effets de la réfraction simple. Nous allons en citer quelques-uns.

1° *Relèvement des objets immergés.* — Par suite de la réfraction, les corps plongés dans l'eau, ou dans tout autre milieu plus réfringent que l'air, paraissent *rapprochés* de la surface de séparation; ils en paraîtraient, au contraire, *écartés*, s'ils étaient immergés dans un milieu moins réfringent.

1. L'indice varie avec *les milieux* : celui de l'eau par rapport à l'air est $\frac{4}{3}$; *celui du crown-glass ordinaire est* $\frac{3}{2}$.

Soit, par exemple, un objet L plongé dans une masse d'eau (fig. 369). En passant de ce liquide dans l'air, les rayons LB, LA,... s'écartent de la normale au point d'incidence et prennent les directions AC, BD,... dont les prolongements concourent sensiblement en un point L'. L'œil qui reçoit ces rayons voit donc l'objet L relevé en L'.

Fig. 369.

Plus les rayons AC, BD,... sont réfractés, plus l'objet paraît relevé. C'est ainsi que le fond d'un vase plein d'eau, ou bien le lit d'une rivière, paraît plus ou moins relevé. C'est par le même effet qu'un bâton plongé obliquement dans l'eau *semble* brisé.

2° *Réfraction atmosphérique.* — C'est encore par un effet de réfraction que les astres nous paraissent relevés au-dessus de l'horizon. En effet, les couches de l'atmosphère augmentent de densité en se rapprochant du sol; or, pour un même gaz, l'indice de réfraction croît avec la densité; il en résulte qu'en entrant dans l'atmosphère et en s'y propageant, les rayons lumineux se brisent (fig. 370), en décrivant une courbe qui arrive jusqu'à l'œil en A : c'est donc suivant la tangente à cette courbe que nous voyons l'astre en S' au lieu de le voir en S.

Fig. 370.

L'effet est d'autant plus marqué que l'astre est plus voisin de l'horizon. Dans nos climats, la réfraction atmosphérique relève les astres d'un peu plus d'un demi-degré (environ 34'). Comme le Soleil et la Lune ont des diamètres apparents moindres que 34', leurs disques apparaissent tout entiers — en mer, où rien ne les masque — avant même que leur sommet ait émergé au-dessus de l'horizon. La journée se trouve donc avancée au lever, et allongée au coucher du soleil, par suite de la réfraction atmosphérique.

Fig. 371.

380. **Angle limite. — Phénomène de la réflexion totale.** — Quand un rayon lumineux passe d'un milieu dans un autre moins réfringent, par exemple de l'eau dans l'air, on a vu que l'angle de réfraction est alors plus grand que l'angle d'incidence. Il suit de là que, lorsque la lumière se propage dans une masse d'eau, de S en O (fig. 371), il y a toujours une valeur de l'angle d'incidence SOB pour laquelle l'angle de réfraction AOR devient égal à un angle droit : le rayon réfracté OR sort alors sous une incidence *rasante, c'est-à-dire* parallèlement à la surface de l'eau.

Cet angle SOB se nomme l'*angle limite*, parce que pour tout angle d'incidence plus grand, tel que POB, le rayon incident PO ne peut donner naissance à aucun rayon réfracté : l'expérience prouve qu'il y a alors suivant OQ *réflexion intérieure*. On la nomme *réflexion totale*, parce que la lumière incidente est alors réfléchie *en totalité*.

Soit λ l'angle limite. Il est défini par cette condition que l'angle de réfraction extérieure r soit égal à 90 degrés, et que, par suite, $\sin r = 1$. Si donc, dans la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$, on fait $\sin r = 1$, on aura $\sin \lambda = \frac{1}{n}$; donc $\lambda = \text{arc} \sin \frac{1}{n}$[1].

Si l'on suppose un point lumineux O placé dans un milieu plus

Fig. 372.

réfringent que l'air (fig. 372), le cône de rayons lumineux ayant pour angle au sommet le double de l'angle limite, divise l'espace en deux régions : 1° dans l'intérieur du cône tous les rayons qui tombent sur la surface de séparation émergent dans l'air, parce qu'ils font un angle d'incidence intérieur moindre que λ; 2° à l'extérieur du cône, tous les rayons incidents subissent la réflexion totale, parce qu'ils font un angle d'incidence intérieur plus grand que λ.

381. Mirage. — Explication de Monge. — Le *mirage* est une illusion d'optique qui fait voir l'image renversée des objets éloignés. Ce phénomène s'observe fréquemment dans les pays chauds, et particulièrement dans les plaines sablonneuses de l'Égypte : le sol présente alors l'aspect d'un lac tranquille, sur lequel se réfléchissent les arbres et les villages environnants. Ce phénomène a

1. *De l'eau à l'air, l'angle limite est de* 48°35'; du verre à l'air, il est de 41° 48'.

été observé dès la plus haute antiquité; mais c'est Monge le premier qui en a donné l'explication.

Le mirage est, d'après lui, un effet très simple de *réflexion totale*. Au-dessus des sables brûlants du désert, les couches d'air, s'échauffant à leur contact, se superposent par ordre de densités croissantes de bas en haut. Un rayon lumineux, tombant d'un objet élevé A (fig. 373) vers le sol, traverse des couches de moins en moins denses et par conséquent de moins en moins réfringentes; l'angle d'incidence croît donc d'une couche à la suivante, et

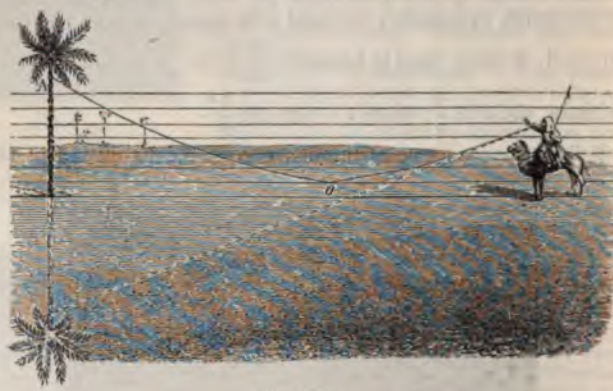


Fig. 373.

finit par atteindre la valeur limite : le rayon subit alors la réflexion intérieure, il se relève, comme le montre la figure, et se réfracte en suivant un chemin inverse et symétrique de la courbe AO, car il passe maintenant dans des couches de plus en plus réfringentes. La lumière arrive donc à l'œil de l'observateur dans la même direction que si elle venait d'un point situé au-dessous du sol et symétrique du point A (par rapport à la couche où s'est produite la réflexion); il voit une image renversée de l'objet qui l'a émis, comme si elle s'était réfléchie au point *o*, sur la surface d'un miroir.

Autre effet de mirage. — Il arrive aussi que les navigateurs observent dans l'atmosphère l'image renversée des côtes ou des navires éloignés. C'est encore un effet de mirage, mais qui se produit en sens contraire du premier, c'est-à-dire lorsque la mer est plus froide que l'air : ce sont alors les couches inférieures de l'atmosphère qui sont les plus denses, à cause de leur contact avec la surface des eaux.

TRANSMISSION PAR LES MILIEUX RÉFRINGENTS. — LAMES ET PRISMES.

382. Lames à faces parallèles. — *Loi.* — Lorsque la lumière traverse une lame transparente à faces parallèles, les rayons émergents *sont parallèles* aux rayons incidents.

Démonstration. — Soient une glace à faces parallèles (fig. 374) (représentée par une section perpendiculaire à ses faces), SA un

rayon incident, DB le rayon émergent, i et r les angles d'incidence et de réfraction à l'entrée du rayon, enfin r' et i' les mêmes angles à sa sortie.

En A, la lumière éprouve une première réfraction, déterminée par l'équation $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ (n étant l'indice du verre par rapport à l'air). En D, elle se réfracte une seconde fois, et l'équation est alors $\frac{\sin r'}{\sin i'} = n'$ (n' étant l'indice de l'air par rapport au verre). Or on a vu (378) que ces deux indices sont inverses l'un de l'autre, c'est-à-dire que

Fig. 374.

$n' = \frac{1}{n}$; on a donc $\frac{\sin r'}{\sin i'} = \frac{\sin r}{\sin i}$.

Mais, les deux normales en A et en B étant parallèles, les angles r et r' sont égaux comme alternes-internes. Les numérateurs des deux rapports ci-dessus étant égaux, il en est de même des dénominateurs : d'où l'on conclut que les angles i' et i (inférieurs l'un et l'autre à 90°) sont égaux, et par suite que DB est parallèle à SA.

Vérification — 1° Si le rayon lumineux tombe normalement à

Fig. 375.

une face, il sort de la lame dans le prolongement même de sa direction d'incidence. S'il tombe obliquement, il subit, en traversant la lame, non pas une déviation, mais un déplacement latéral, qu'on *pourrait aisément calculer*, et qui est plus ou moins

grand, suivant l'angle d'incidence et l'épaisseur de la lame.

Si l'on pose une lame de verre sur une feuille de papier où l'on a tracé des lignes droites ou courbes (fig. 575), en regardant obliquement à travers la lame, on voit une solution de continuité dans les lignes, et on n'en voit pas en regardant normalement.

583. **Mesure des indices de réfraction : Méthode du duc de Chaulnes.** — Il en résulte aussi que, si l'on regarde un point lumineux S sous une incidence peu oblique (fig. 576) à travers une lame à faces parallèles d'indice n et d'épaisseur e, l'on en voit une image S' rapprochée de l'œil. Si l'on calcule ce déplacement vertical apparent d sur la normale SS', on le trouve sensiblement égal à $\frac{n-1}{n}e$[1].

Fig. 576.

Le duc de Chaulnes a utilisé ce fait pour la mesure de l'indice de réfraction d'une substance qu'on peut tailler en lames à faces parallèles[2]. On trace un trait au diamant sur une lame plane de verre ordinaire, et l'on vise ce trait à l'aide d'un microscope muni d'une vis de mise au point micrométrique. Si l'on superpose alors au verre la lame d'indice inconnu, la mise au point est dérangée de tout le déplacement de l'image du trait. Pour remettre l'instrument au point, il faut remonter le corps du microscope de cette distance d, qui est mesurée à l'aide de la vis.

Reste à connaître l'épaisseur e de la lame. On pourrait la mesurer au sphéromètre; mais il suffit de mettre au point le microscope successivement sur la face supérieure et sur la face inférieure de la lame. La première mise au point se réalise en visant, par exemple, une poussière sur la face supérieure; la deuxième en supprimant la lame et en visant de nouveau le trait sur le support en verre. La longueur dont on a déplacé le microscope pour faire ces deux visées est égale à e.

1. En effet, menons IK, parallèle et égale à d. Dans le triangle KII', on a

$$\frac{d}{\sin(i-r)} = \frac{\mathrm{II'}}{\sin i},$$

et dans le triangle HII', on a $\mathrm{II'} = \frac{e}{\cos r}$; d'où, en remplaçant,

$$d = e\frac{\sin(i-r)}{\sin i \cos r} = e\frac{\sin i \cos r - \sin r \cos i}{\sin i \cos r} = e\left(1 - \frac{1}{n}\frac{\cos i}{\cos r}\right).$$

Pour les rayons, tels que SI, très voisins de la normale, on peut considérer le rapport $\frac{\cos i}{\cos r}$ comme égal à l'unité. Il reste alors

$$d = e\frac{n-1}{n}.$$

2. *Voir Chappuis et Berget, Leçons de physique générale*, tome III.

384. Prismes. — 1° *Définitions.* — On nomme *prisme*, en optique, tout milieu transparent compris entre deux faces planes inclinées l'une sur l'autre.

L'intersection de ces deux faces est une ligne droite qu'on appelle l'*arête* du prisme, et l'angle dièdre qu'elles comprennent est son *angle réfringent*; toute section perpendiculaire à l'arête est une *section principale*. Les prismes qu'on emploie pour les expériences ont la forme géométrique de prismes triangulaires droits (fig. 377), et leur section principale est un triangle (fig. 378). Dans cette section, le point A prend le nom de *sommet* du prisme, la droite CB est dite sa *base* et l'angle plan CAB en est l'*angle réfringent*.

Fig. 377.

Fig. 378.

2° *Réfraction dans la section principale.* — Lorsqu'un rayon lumineux tombe dans une section principale, il y reste nécessairement en se réfractant.

Soit OD un rayon incident; il se réfracte en D, en se rapprochant de la normale, puisqu'il entre dans un milieu plus réfringent, et prend une direction DK, déterminée par l'équation $\frac{\sin i}{\sin r} = n$. En K, le rayon subit une seconde réfraction, il s'écarte de la normale et prend une direction KH, donnée par l'égalité $\frac{\sin i'}{\sin r'} = n$, en appelant r' l'angle d'incidence intérieure et i' l'angle d'émergence.

On voit donc que ces deux réfractions successives dévient la lumière dans le même sens, de manière que *le rayon émergent* KH *est abaissé vers la base du prisme.*

De plus, si l'on reçoit dans l'œil les rayons émergents, c'est nécessairement en O' qu'on voit le point ou l'objet lumineux, sur leur direction prolongée : donc *les objets vus à travers un prisme paraissent relevés vers son sommet.*

Enfin, cette image O' est virtuelle, puisqu'elle est formée par les

prolongements des rayons : on l'appelle le *foyer virtuel* du prisme. Les prismes donnent donc des images virtuelles des objets lumineux regardés à travers leur masse.

3° *Angle de déviation.* — La déviation que le prisme imprime à la lumière est mesurée par l'angle OEO′ que forme le rayon émergent DO avec la direction du rayon incident (fig. 378) : c'est l'*angle de déviation*.

Cet angle augmente avec l'indice de réfraction et avec l'angle réfringent du prisme; il varie aussi avec l'angle d'incidence du rayon qui tombe sur le prisme : il est une fonction de ces trois variables.

On peut démontrer ce fait soit par le calcul, à l'aide d'équations appelées *formules du prisme*, soit par des expériences directes.

385. **Formules du prisme.** — Soit AMM′ la section principale d'un prisme (fig. 379), SI le rayon incident, II′R la marche du rayon à travers le prisme, IN et I′N′ les normales au point d'incidence et d'émergence, A′ leur point de rencontre. Soit d l'angle de déviation ROS′ qu'il s'agit d'évaluer. On a d'abord :

Fig. 379.

$$[1] \qquad \sin i = n \sin r,$$

$$[2] \qquad \sin i' = n \sin r'.$$

De plus, l'angle intérieur A′ des deux normales peut être considéré comme appartenant soit au triangle A′II′, soit au quadrilatère A′IAI′. Dans le triangle, il est supplémentaire des angles à la base r et r', ce qui donne

$$A' = 180^\circ - (r + r').$$

Dans le quadrilatère, qui est *inscriptible* (puisque les angles opposés I et I′ sont droits), A′ est supplémentaire de l'angle A, ce qui donne

$$A' = 180^\circ - A.$$

En comparant ces deux égalités, on en tire

$$[3] \qquad r + r' = A.$$

Enfin l'angle d, étant extérieur au triangle OII′, est égal à la

somme des angles à la base, II'O et I'IO. Or on voit aisément que $II'O = i' - r'$ et que $I'IO = i - r$. On a donc

$$d = (i - r) + (i' - r') = i + i' - (r + r'),$$

d'où
$$d = i + i' - A. \qquad [4]$$

Ces quatre équations constituent les *formules du prisme*. Il y entre, avec l'inconnue d, les six variables A, n, i, i', r, r'; mais on conçoit qu'on puisse exprimer trois d'entre elles, par exemple i', r et r', en fonction des trois autres, à l'aide des trois premières équations. En portant ces valeurs dans l'équation [4], celle-ci ne contiendrait plus que d, i, A et n. On peut donc considérer d comme étant une fonction de ces trois variables.

386. **Étude expérimentale de la déviation.** — 1° *d croît avec n.* — *Polyprisme.* — On nomme *polyprisme* un prisme formé de

Fig. 380.

Fig. 381.

plusieurs prismes de même angle, accolés par leurs sections principales (fig. 380); ils sont de substances inégalement réfringentes, par exemple de verre, de flint, de cristal de roche, de crown. Or, si l'on regarde une ligne droite à travers le polyprisme, ses différentes parties sont vues à des hauteurs inégales. La portion la plus *relevée* est celle *qu'on voit à travers* le flint, dont l'indice de *réfraction est le plus grand; puis* vient celle qui est vue à travers

le cristal de roche, et ainsi de suite dans l'ordre des indices de réfraction décroissants.

2° *d croît avec* A. — *Prisme à angle variable.* — On appelle ainsi un prisme constitué par deux glaces *m* et *n* mobiles sur charnières, et pouvant glisser à frottement dur entre deux plaques de cuivre parallèles B et C, fixées sur un pied (fig. 381). Elles forment ainsi avec ces plaques une sorte de vase parfaitement clos. En y versant de l'eau, ou tout autre liquide transparent, et en inclinant plus ou moins les glaces, on a un prisme à angle variable.

Si l'on reçoit un rayon lumineux S sur l'une des faces, et si l'on incline l'autre de plus en plus, l'angle du prisme croît, et on voit augmenter la déviation du rayon émergent E.

3° *d varie avec i.* — *Déviation minimum.* — Lorsqu'on reçoit

Fig. 382.

un faisceau de lumière *monochromatique* à travers une fente verticale (fig. 382), ce faisceau va projeter une trace lumineuse sur un écran éloigné. Mais si l'on interpose un prisme vertical entre l'ouverture du volet et l'écran, le faisceau est dévié vers la base du prisme et vient se projeter en D : la distance CD est proportionnelle à l'angle de déviation. Or, si l'on tourne alors le support du prisme de manière à diminuer graduellement l'angle d'incidence, on voit le faisceau D se rapprocher graduellement du point C : ce qui prouve que la déviation décroît en même temps que l'angle *i*. Mais si, à partir d'une certaine position E du faisceau, l'on continue à diminuer *i*, on voit le faisceau revenir sur lui-même, vers le point D : cela prouve que la déviation *croît*, après avoir *décru*, bien qu'on tourne le prisme toujours dans le *même sens*.

La déviation d est donc une fonction de *i*, qui passe par un *minimum pour* une certaine valeur de la variable. La valeur cor-

respondante de la fonction est ce qu'on appelle la ***déviation minimum***.

587. Condition expérimentale de la déviation minimum. — On peut déterminer, soit par l'expérience, soit par le calcul, la valeur de i qui correspond à la déviation minimum.

1° *Expérience.* — L'expérience montre que, au moment où la position du minimum de déviation est atteinte, la partie intérieure du rayon réfracté est également inclinée sur les deux faces du prisme. On en déduit que les deux angles de réfraction r et r' sont égaux. Or, si l'on porte cette condition $r = r'$ dans l'équation [3], elle devient

$$2r_m = A, \quad \text{d'où} \quad r_m = \frac{A}{2}.$$

Connaissant l'angle r_m, on aura l'incidence i_m correspondante au minimum par l'équation [1] :

$$[5] \qquad \sin i_m = n \sin \frac{A}{2}.$$

2° *Calcul.* — On arrive à la même condition en cherchant, par le calcul algébrique, pour quelle valeur de i la fonction d passe par un minimum.

Ajoutons les valeurs de $\sin i$ et de $\sin i'$, données par les équations [1] et [2], et remplaçons la somme des sinus par les produits équivalents, il vient

$$\sin \frac{i + i'}{2} \cos \frac{i - i'}{2} = n \sin \frac{r + r'}{2} \cos \frac{r - r'}{2}.$$

Or d'après l'équation [4] on a $i + i' = A + d$, et d'après l'équation [3] on a $r + r' = A$. L'égalité précédente devient donc

$$\sin \frac{A + d}{2} = n \sin \frac{A}{2} \frac{\cos \frac{r - r'}{2}}{\cos \frac{i - i'}{2}}.$$

Or l'accroissement $(r - r')$ de l'angle de réfraction est toujours inférieur à l'accroissement $(i - i')$ de l'angle d'incidence correspondant [1]. Il s'ensuit donc que le rapport des cosinus est toujours plus grand que l'unité. Il atteindra donc son minimum quand il sera égal à *un*, ce qui ne peut avoir lieu qu'autant que l'on a $r = r'$ et $i = i'$. Telle est la condition du minimum [1].

Valeur de la déviation minimum. — Soit δ cette valeur : on

1. Il suffit de remarquer que l'accroissement de $\sin i$ est égal à n fois l'accroissement de $\sin r$ (n *étant* > 1), et que les angles i et r, plus petits *que 90°, croissent comme leurs sinus.*

peut la déduire aisément de celle de l'angle i_m ou de l'angle r_m. En effet, si dans l'équation [4] l'on fait $i = i' = i_m$, on a

$$(6) \qquad \delta = 2\,i_m - A,$$

i_m étant défini par l'équation [5].

388. **Condition d'émergence dans les prismes.** — Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que le rayon qui pénétrait en I dans le prisme en émergeait en I'. Or l'émergence n'a pas toujours lieu, parce que le rayon émergent doit passer d'un milieu plus réfringent dans un milieu moins réfringent. On démontre que *les rayons lumineux qui se sont réfractés sur la première face d'un prisme ne peuvent émerger à la deuxième face qu'autant que l'angle réfringent du prisme est moindre que le double de l'angle limite de la substance du prisme.*

En effet, soient AMM' la section principale du prisme (fig. 383) et SI un rayon quelconque. Tous les rayons qui tombent en I peuvent évidemment pénétrer dans le prisme, quel que soit leur angle d'incidence, depuis 0° jusqu'à 90°. Ils y sont compris dans un angle égal à 2λ (λ étant l'angle limite) et ayant pour bissectrice la normale IN à la face d'incidence Cette portion du plan est le *lieu géométrique* de tous les rayons qui peuvent entrer au point I dans la section principale du prisme; SII' est l'un de ces rayons : il fait en I' un angle d'incidence intérieur r' et il ne peut émerger que si r' a une valeur inférieure ou tout au plus égale à λ.

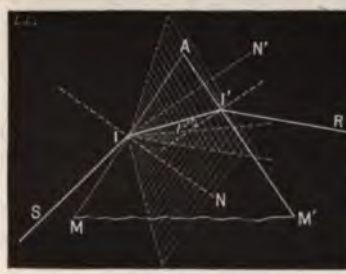


Fig. 383.

Menons du point I une perpendiculaire IN' à la face d'émergence; l'angle I'IN' étant égal à r', tout rayon émergent doit faire avec cette normale un angle $< \lambda$ ou $= \lambda$; donc *tous les rayons qui émergent* sont compris dans un deuxième angle, égal au précédent, et ayant pour bissectrice IN' (nous l'ombrons par des hachures perpendiculaires à IN').

Le *lieu* des rayons qui émergent, parmi ceux qui sont entrés, est donc *la partie du plan commune à ces deux angles.*

De cette construction géométrique on peut déduire à quelle condition un prisme d'ouverture donnée pourra servir à la réfraction. Pour qu'il y ait un faisceau émergent, il faut que ces deux angles se coupent; or la condition d'intersection est évidemment que les bissectrices IN et IN' fassent entre elles un angle N'IN $< 2\lambda$, ou au plus $= 2\lambda$; or l'angle N'IN est précisément égal à l'angle A : la condition d'intersection est donc $A < 2\lambda$ ou $= 2\lambda$. Si $A = 2\lambda$, le faisceau émergent se réduira aux rayons qui ont pénétré dans le prisme en rasant la surface d'incidence. Si A est $< 2\lambda$, le faisceau émergent sera d'autant plus épais que l'angle A sera plus petit.

389. **Prismes à réflexion totale.** — On a vu qu'un prisme d'indice déterminé ne peut servir à la réfraction qu'autant que son

angle réfringent est moindre que 2λ ou au plus égal à 2λ. Si l'on a $A > 2\lambda$, aucun rayon incident n'émergera ; tout rayon qui aura pénétré dans le prisme *se réfléchira totalement* sur la face d'émergence au lieu de la traverser : on aura alors un *prisme à réflexion totale*.

L'ouverture d'un pareil prisme dépend de son indice de réfraction, puisque $\sin \lambda$ est égal à l'inverse de l'indice n. Plus la substance sera réfringente, plus l'ouverture limite du prisme à réflexion totale sera petite. Pour le verre ordinaire, l'indice est $\frac{3}{2}$ et l'angle limite 41° 48′ : il suffirait donc de donner au prisme une ouverture de 84° pour qu'il réfléchit totalement tous les rayons incidents. *A fortiori*, les prismes rectangulaires (fig. 384) dont la section est un triangle rectangle isocèle, seront-ils *à réflexion totale*.

Fig. 384.

Et, en effet, le rayon OH, perpendiculaire à la face BC, entre dans le verre sans réfraction et va faire avec la face AB un angle égal à 45°, plus grand que l'angle limite du verre. Le rayon OH subit donc en H la réflexion totale, qui lui imprime une direction HI perpendiculaire à la seconde face AC. La grande face du prisme produit donc ici l'effet du miroir plan le plus parfait, et l'œil placé en I voit en O′ l'image symétrique du point O.

590. **Foyers d'un prisme.** — Lorsqu'un pinceau lumineux, compris entre deux rayons, d'incidences i et $i + di$, pénètre dans un milieu plus réfringent A, il prend

Fig. 385.

Fig. 386.

la direction $I'' I_1$ (fig. 385) *et les prolongements* des rayons réfractés viennent se *couper en un point P′, qui est le foyer (virtuel)* du point P. Si l'on appelle p la

distance PI et p' la distance P' I, on démontre qu'il y a entre elles la relation

$$[1] \qquad p' = pn \frac{\cos^2 r}{\cos^2 i}.$$

Dans le cas d'un prisme (fig. 386), il y a deux réfractions successives sur les deux faces, et par suite il y a deux foyers virtuels P' et P''. Les distances aux faces correspondantes du prisme, comptées sur les rayons incidents, sont p et p' pour la première face, p'_1 et p''_1 pour la deuxième face. La relation entre p' et p est donnée par l'équation [1]. La relation entre p'_1 et p''_1 sera donnée par une équation analogue,

$$[2] \qquad p''_1 = p'_1 \frac{1}{n} \frac{\cos^2 i'}{\cos^2 r'}.$$

Lorsque le trajet de la lumière dans le prisme est négligeable par rapport à la distance du point lumineux, on peut considérer les distances p' et p'_1, p'' et p''_1, comme égales entre elles, et l'équation [2] peut alors s'écrire

$$[2\ bis] \qquad p'' = p' \frac{1}{n} \frac{\cos^2 i'}{\cos^2 r'}.$$

En multipliant membre à membre les équations [1] et [2 *bis*], il vient

$$p'' = p \frac{\cos^2 r \cos^2 i'}{\cos^2 i \cos^2 r'}.$$

Si l'on fait tomber les rayons tout près du sommet A, on peut considérer p'' et p comme les distances du point et de son foyer au sommet.

Conséquences. — 1° Si le prisme est orienté dans la position du minimum, on a $p'' = p$, car on a $i' = i$ et $r' = r$.

Donc le foyer virtuel est à la même distance du sommet du prisme que le point lumineux.

2° Cette distance étant indépendante de n, si la lumière émise par P est composée, tous les foyers virtuels correspondants aux diverses radiations seront répartis sur une circonférence ayant P pour centre et p pour rayon.

Par suite, si l'on reçoit le faisceau dans une lunette mise au point pour l'un des foyers, elle sera également mise au point pour tous les autres. Cette conséquence est le principe même du spectroscope (424).

391. **Mesure des indices.** — Newton déduisit de la déviation minimum une méthode générale pour mesurer les indices de réfraction des corps solides, liquides et gazeux. Elle consiste à appliquer la formule de la déviation minimum. On a, d'une part,

$$i_m = \frac{A + \delta}{2} \qquad \text{et} \qquad n = \frac{\sin i_m}{\sin \frac{A}{2}},$$

d'où l'on tire

$$n = \frac{\sin \frac{A + \delta}{2}}{\sin \frac{A}{2}}.$$

Il suffit de déterminer directement A et δ.

Ces deux mesures se font au moyen du même instrument, le goniomètre[1]. Le *modèle le plus simple* est le goniomètre de Babinet.

1. *De* γωνία, angle, et μέτρον, mesure.

Il se compose essentiellement d'un cercle gradué (fig. 387 et 388) que l'on peut rendre horizontal au moyen de vis calantes, et sur lequel peut se mouvoir une lunette. Cette lunette porte un réticule dont l'un des fils est vertical; on s'assure que cette condition est remplie en visant une mire verticale éloignée, par exemple une tige de paratonnerre. Le prisme A, qui doit servir aux mesures, est fixé à la cire molle sur une plate-forme munie de trois vis calantes, ce qui permet de rendre verticale l'arête réfringente du prisme. De plus cette plate-forme peut tourner autour du centre du cercle, grâce à une alidade mobile qui permet de mesurer les déplacements angulaires sur le limbe divisé. Enfin, un collimateur C (424, II, 2°) permet de faire tomber sur le prisme un faisceau de rayons parallèles.

Mesure de δ. — On met d'abord le prisme à peu près dans la position du minimum; on pointe alors la lunette sur la fente lumineuse P du collimateur, et l'on achève ainsi la détermination rigoureuse de la position du minimum.

On peut s'arranger de manière que le faisceau incident rase l'arête réfringente A (fig. 387), et s'y partage en deux faisceaux : l'un qui poursuit sa route recti-

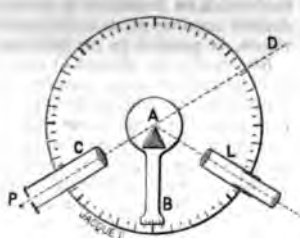


Fig. 387.

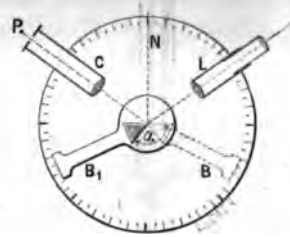


Fig. 388.

ligne suivant AD, l'autre qui subit la réfraction suivant AL. Il suffit de pointer successivement sur les deux directions : la distance angulaire des deux positions successives de la lunette, comptée sur le limbe gradué, donne l'angle δ.

Mesure de A. — On fait arriver tout près du sommet du prisme le faisceau parallèle provenant du collimateur, qui se réfléchit sur l'une des faces (fig. 388), et l'on vise dans la lunette le faisceau réfléchi. Puis, laissant en place le faisceau incident et la lunette, on fait tourner le prisme d'un angle tel, que la deuxième face vienne se placer dans le prolongement de la position précédente de la première face : ce deuxième miroir coïncidant alors avec le premier, on retrouve dans la lunette le faisceau réfléchi. L'angle α dont on a tourné le prisme est égal à 180° — A. Il est directement mesuré par le déplacement de l'alidade[1].

Cette méthode est due à Wollaston : c'est celle qu'emploient les minéralogistes pour mesurer les angles dièdres des cristaux. Nous l'avons citée précédemment (360) comme application des miroirs plans.

2° *Cas des liquides.* — Biot a appliqué la même méthode aux liquides. On prend des prismes creux qu'on remplit du liquide en expérience et qu'on ferme à l'aide de glaces à faces parallèles.

Quand ces glaces ne sont pas absolument parfaites, le procédé laisse à désirer

1. *Voir Chappuis et Berget, Leçons de physique générale*, tome III.

M. Macé de Lépinay a indiqué une méthode de correction pour ce genre d'erreur[1].

3° *Cas des gaz.* — Biot et Arago employèrent la même méthode, à l'aide d'un prisme creux formé d'un tube de verre épais AB (fig. 389) dont les deux bouts, taillés en biseau, étaient fermés par deux glaces à faces parallèles inclinées de 145° : c'était l'*angle réfringent* du prisme. La cavité du prisme communiquait avec l'extérieur au moyen d'une tubulure à robinet terminée par un pas de vis. On pouvait ainsi faire le vide à volonté dans le prisme et y introduire le gaz qu'on voulait étudier, après l'avoir purifié et desséché. La cavité intérieure communiquait également avec une cloche en verre H, vissée dans le prolongement supérieur de la tubulure. Cette cloche renfermait un baromètre à siphon qui donnait exactement, dans chaque expérience, la pression du gaz intérieur.

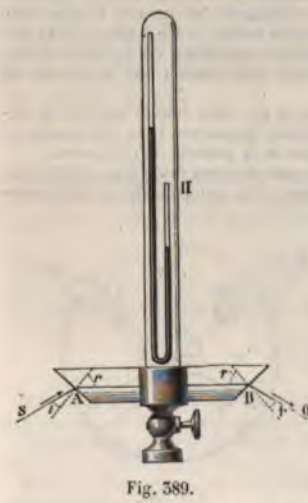


Fig. 389.

Résultats. — Ils obtenaient ainsi l'indice des gaz, pris à une température et à une pression déterminées, par rapport à l'air atmosphérique. Ils trouvèrent que ce coefficient *n'est pas constant pour un même gaz*, parce qu'il dépend non seulement de la température et de la pression du gaz, mais aussi de celles de l'air ambiant.

Aussi cherchèrent-ils à déterminer pour chaque gaz son *indice de réfraction absolu* (c'est-à-dire l'indice pris par rapport au vide), dans les conditions normales de température et de pression. On avait évidemment, en appelant n l'indice *relatif* ainsi déterminé, n_0 et n'_0 les indices *absolus* du gaz intérieur et de l'atmosphère ambiante,

$$n = \frac{n_0}{n'_0}.$$

Ils arrivèrent à déterminer n_0 pour l'air et les gaz, en combinant la mesure directe de n avec une loi empirique qu'ils exprimaient par l'équation

$$\frac{n_0^2 - 1}{d} = \text{constante}$$

d densité du milieu d'indice absolu n_0) et qu'ils énonçaient ainsi : *le pouvoir réfringent des gaz est constant.*

Cette loi s'est trouvée vérifiée par leurs expériences, puis par les expériences postérieures de Dulong, puis de Jamin.

Loi de Gladstone. — Une loi analogue a été étendue à toutes les substances transparentes par MM. Gladstone et Dales. Ils ont trouvé

$$\frac{n - 1}{d} = \text{constante}.$$

Cette constante est caractéristique de chaque substance.

1. *Macé de Lépinay, Mesure des indices de réfraction des liquides (Journal de Physique, 1re série, t. IX).*

TRANSMISSION PAR LES MILIEUX RÉFRINGENTS. — LENTILLES.

392. **Définitions.** — On appelle *lentilles* des milieux transparents limités par des surfaces courbes de révolution. Suivant que les méridiennes des surfaces terminales sont des lignes droites ou des cercles, les lentilles sont dites *cylindriques* ou *sphériques*.

Elles sont généralement faites en *crown-glass*, verre qui contient peu de plomb, ou en *flint-glass*, verre qui en contient beaucoup et est plus réfringent que le crown.

Lentilles convergentes et divergentes. — En combinant des surfaces sphériques soit entre elles, soit avec des surfaces planes, on obtient six espèces de lentilles (fig. 390, coupe); quatre d'entre elles sont formées chacune par deux surfaces sphériques, et deux

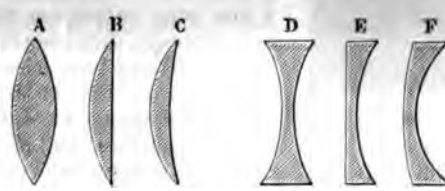


Fig. 390.

par une surface plane et une surface sphérique. La première, A, est dite *biconvexe*; la seconde, B, *plan-convexe*; la troisième, C, *concave-convexe*; la quatrième, D, *biconcave*; la cinquième, E, *plan-concave*, et la dernière, F, *convexe-concave*. La lentille C s'appelle aussi *ménisque convergent*, et la lentille F *ménisque divergent*.

Les trois premières, qui sont plus épaisses au centre que sur les bords, sont *convergentes*; les dernières, qui sont plus minces au centre, sont *divergentes*.

Axe principal. — Dans les lentilles à surfaces sphériques, les centres de ces sphères sont appelés *centres de courbure* et la droite menée par les deux centres est l'*axe principal* (fig. 391). Dans une lentille plan-concave ou plan-convexe, l'axe principal est la perpendiculaire abaissée du centre de la face sphérique sur la face plane.

Section principale. — On nomme *section principale* d'une lentille toute section faite par un plan passant par l'axe principal.

393. **Analogie physique d'une lentille et d'un prisme.** — On peut assimiler la réfraction de la lumière dans les lentilles à la

réfraction dans les prismes en les supposant limitées par une *infinité* d'éléments plans *infiniment petits*. La *normale* en un point quelconque est alors la perpendiculaire au plan tangent qui contient l'élément correspondant. On peut concevoir aux points conjugués, d'incidence et d'émergence, I et I', deux surfaces planes plus ou moins inclinées entre elles, produisant l'effet d'un prisme d'angle A (fig. 391). Et alors chacune des lentilles A, B, C (fig. 390) peut être assimilée à un ensemble de prismes ayant leurs bases réunies et tournées vers l'axe principal OO' et les lentilles D, E, F à une suite de prismes tournés en sens contraire. Cela montre pourquoi les premières doivent faire *converger* les rayons vers l'axe et les dernières les faire *diverger*. Aussi toutes les lentilles convexes sont-elles *convergentes*, et toutes les lentilles concaves *divergentes*.

Fig. 391.

394. **Lentilles minces convergentes : Étude géométrique et expérimentale.** — La théorie des lentilles sphériques (convergentes ou divergentes) peut se faire, comme celle des miroirs sphériques, avec une certaine approximation qui suffit dans bien des cas, en admettant tout d'abord les hypothèses suivantes :

1° Les lentilles sont *minces*, c'est-à-dire que leur épaisseur est négligeable et n'intervient pas dans les constructions de rayons réfractés.

2° Elles ont une *faible ouverture* (10 à 12 degrés), ou du moins elles n'admettent que des *rayons centraux*, c'est-à-dire des rayons *peu éloignés* de l'axe géométrique, *parallèles* à cet axe ou *peu inclinés* sur sa direction.

3° L'objet lumineux est supposé *placé symétriquement* par rapport à l'axe principal, de sorte que tous les phénomènes lumineux sont eux-mêmes *symétriques* par rapport à cet axe. Par conséquent toutes les constructions seront faites dans le plan de la section principale qui contient le point lumineux ou le centre de l'objet lumineux. Et elles seront simplifiées par ce fait que la *lentille mince* pourra être représentée par une simple ligne droite, *ou encore qu'on pourra* ne considérer que des rayons tombant au *bord de la lentille*, dans la région sans épaisseur.

Explication de la convergence. — Tout rayon SII'R qui traverse une lentille convergente est dans le même cas que s'il traversait un prisme A, de même substance, ayant pour faces les plans tangents en I et en I' (fig. 392). Ce prisme est toujours de *petite ouverture*. La déviation d est précisément égale à celle que produit ce prisme et elle est donnée par les formules du prisme. Celles-ci sont notablement simplifiées quand on y introduit l'hypothèse des petits angles, ce qui consiste à y faire $i = \sin i$, $\sin i' = i'$, etc. Elles deviennent

Fig. 392.

[1] $i = nr$,

[2] $i' = nr'$,

[3] $A = r + r'$,

[4] $d = (n - 1)A$.

En appelant A l'angle du prisme de petite ouverture qu'on peut substituer à la lentille, on a pour la déviation d'un rayon lumineux tel que SII'R

[5] $$d = (n - 1)A.$$

395. **Foyers : Définitions et détermination.** — On nomme *foyers* les points où vont concourir les rayons réfractés ou leurs prolongements.

1° *Foyer principal.* — Lorsqu'un faisceau lumineux LBMN tombe sur la lentille parallèlement à son axe principal (fig. 393), l'*expérience prouve* que *tous les rayons*, après leur réfraction, *vont très sensiblement concourir* en *un point unique* F.

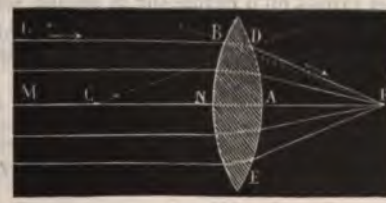


Fig. 393.

Ce point est le *foyer principal*, et la distance AF est la *distance focale principale*. Elle est constante pour une même lentille, mais elle varie avec le rayon de courbure et l'indice de réfraction.

Réciproquement, si le point lumineux est placé au foyer principal, le faisceau divergent FDE qu'il envoie sur la lentille en sort parallèle à l'axe principal.

Calcul de la distance focale principale. — Équation au pouvoir convergent. — Soit SA l'un des rayons *parallèles à l'axe* principal (fig. 394); il est réfracté *suivant AF, après avoir subi la déviation d*, donnée par la formule [5]. Évaluons d *et A en fonction des éléments de la lentille.*

L'angle d est égal à l'angle AFO du triangle AOF (angles alternes-internes); on peut donc prendre tang AFO pour mesure de d (hypothèse des petits angles), et écrire

$$d = \text{tang AFO} = \frac{\text{AO}}{\text{OF}}.$$

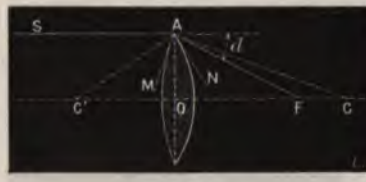


Fig. 394.

D'un autre côté, l'angle A est égal à la somme des angles MAO et NAO; or MAO = ACO et NAO = AC'O (côtés perpendiculaires).

En prenant pour mesure de ces angles leurs tangentes trigonométriques, on a

$$A = \text{tang ACO} + \text{tang AC'O} = \frac{\text{AO}}{\text{CO}} + \frac{\text{AO}}{\text{C'O}}.$$

En substituant dans l'équation [1] et divisant par AO, elle devient

$$\frac{1}{\text{FO}} = (n-1)\left(\frac{1}{\text{CO}} + \frac{1}{\text{C'O}}\right) \quad \text{ou bien} \quad \frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{\text{R}} + \frac{1}{\text{R'}}\right). \quad [1]$$

On voit que la distance f est indépendante du rayon choisi : cela démontre l'existence du foyer principal; l'inverse de cette distance, c'est-à-dire $\frac{1}{f}$, s'appelle le *pouvoir convergent*, et l'équation elle-même est dite *équation au pouvoir convergent*.

2° *Foyers conjugués.* — Soit un point lumineux P, placé sur l'axe au delà du foyer principal, et assez rapproché pour que les rayons qu'il envoie sur la lentille soient divergents (fig. 395). L'*expérience prouve* que tous les rayons partis du point P viennent concourir sensiblement en un même point P' : ce point est le *foyer conjugué* du point P.

Réciproquement, si le point lumineux était porté en P', son foyer conjugué serait en P.

Calcul de la distance focale conjuguée. — Équation aux foyers conjugués. — On peut *démontrer* l'existence du foyer conjugué et en calculer la distance. En effet, l'image P' doit être le point de concours des rayons émanés du point P, après réfraction. L'axe principal (fig. 395) est lui-même un de ces rayons; donc l'image est sur l'axe principal. Soit SA un autre rayon quelconque; il subit la déviation d en se réfractant, et vient couper

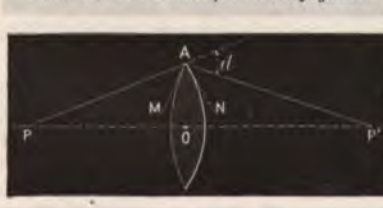


Fig. 395.

l'axe principal en un point P' qui est le foyer conjugué. Soit p la distance OP

qui est donnée, et p' la distance OP' qu'il s'agit de déterminer. L'angle d étant extérieur au triangle APP', on a $d = \text{APP}' + \text{AP}'\text{P}$.

En remplaçant d par sa valeur trouvée ci-dessus (fig. 394), et les angles par leurs tangentes, il vient

$$[2] \qquad \frac{\text{AO}}{f} = \frac{\text{AO}}{p} + \frac{\text{AO}}{p'}, \quad \text{ou} \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

Telle est l'équation fondamentale des lentilles. On l'appelle *équation aux foyers conjugués*, parce que c'est une relation entre les distances focales de deux foyers conjugués P et P'[1].

A mesure que le point P s'approche de la lentille, la divergence des rayons incidents et celle des rayons émergents augmentent, et le foyer conjugué P' s'éloigne. Si P coïncide avec le foyer principal, les rayons émergents sortent parallèles à l'axe, et alors *il n'y a plus de foyer*, ou, comme on dit, *le foyer est rejeté à l'infini dans la direction de l'axe principal.*

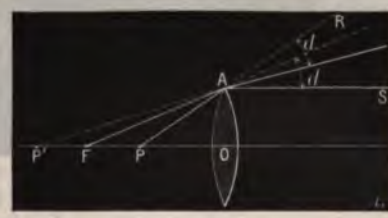


Fig. 396.

3° *Foyer virtuel.* — Dans le cas où le point lumineux P est placé entre la lentille et son foyer principal (fig. 396), l'*expérience prouve* que le foyer conjugué P' est *virtuel.*

Plus le point P se rapproche de la lentille, plus son foyer virtuel P' s'en rapproche aussi.

Calcul de la distance focale conjuguée. — Étant donné qu'un rayon, tel que FA, émané du foyer principal, émerge de la lentille, parallèlement à l'axe principal, il s'ensuit qu'un rayon, tel que PA, qui doit émerger en subissant la même déviation d, ne peut couper l'axe que par son prolongement et du même côté de la lentille. Soit P' le point d'intersection : c'est le foyer conjugué de P ; on voit qu'il est *virtuel.*

On calculera sa distance à la lentille comme précédemment. On a, d'une part, dans le triangle APP'

$$d = \text{APO} - \text{AP}'\text{O}, \qquad \text{et d'autre part} \qquad d = \text{tang AFO}\ \frac{\text{AO}}{f}.$$

En achevant le calcul comme ci-dessus, il vient

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}. \qquad [2]$$

1. Il existe une *autre méthode, également* classique, pour trouver cette équation. *Nous la donnons plus loin, à propos des lentilles épaisses* (406, III).

Telle est l'*équation aux foyers conjugués* dans le cas des foyers virtuels.

On aurait pu la déduire de l'équation [1], en convenant de changer de signe la grandeur p' qui a changé de sens.

396. Centre optique. — Dans toute lentille *l'expérience prouve* qu'il existe un point nommé *centre optique*, situé sur l'axe principal et tel que tout rayon passant par ce point n'éprouve pas de *déviation angulaire* : il sort *plus ou moins déplacé latéralement*, mais *parallèle à sa direction d'incidence*.

Calcul de la position du centre optique. — Menons deux rayons de courbure parallèles, CI et C'I' (fig. 397); les deux éléments des

Fig. 397.

plans tangents en I et I' sont parallèles entre eux, comme perpendiculaires à deux droites parallèles ; par conséquent tout rayon SI qui tombera sur la lentille de manière à la traverser suivant II', traversera en réalité un milieu à faces parallèles, et par conséquent sortira *sans déviation*, c'est-à-dire suivant une direction I'R parallèle à SI.

Or considérons les triangles COI et C'OI' : ils sont semblables comme étant équiangles, et ils donnent

$$\frac{OC}{OC'} = \frac{CI}{C'I'} = \frac{R}{R'}.$$

Donc le point O partage la ligne des centres CC' en deux segments proportionnels aux rayons de courbure : sa position est donc *invariable* et indépendante du rayon considéré.

En retranchant membre à membre les termes extrêmes de la proportion, il vient

$$\frac{R}{R'} = \frac{R - OC}{R' - OC'} = \frac{OA}{OA'};$$

[illegible]alement l'épaisseur de la lentille en deux segments

Le centre optique n'est donc au milieu de la lentille qu'autant qu'on a $R = R'$.

Si la lentille est plan-convexe, ce qui correspond au cas où $R' = \infty$, on a $OA = 0$: donc le centre optique est en A, sur la face courbe.

397. Axes secondaires. — Foyers conjugués secondaires. — Toute droite QQ′ (fig. 398) qui passe par le centre optique O et par un point lumineux Q est l'*axe secondaire* de ce point. D'après la propriété du centre optique, tout rayon qui tombe suivant l'axe secondaire QO émerge suivant la même direction OQ′; car, dans le cas des lentilles *minces*, on peut considérer comme *négligeable* le déplacement latéral subi par le rayon QO.

Fig. 398.

De plus, si l'on considère uniquement les axes secondaires ne faisant avec l'axe principal qu'un petit angle, on peut leur appliquer tout ce qui a été dit jusqu'ici de l'axe principal : c'est-à-dire que les rayons émis d'un point Q doivent tous concourir en un même point P′ de cet axe, qui est son *foyer conjugué*. C'est ce que l'*expérience vérifie*.

Calcul de la distance focale conjuguée. — L'image du point lumineux Q est sur l'axe secondaire QO; elle est aussi sur le rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque QA : donc elle est à l'intersection Q′ de ces deux droites. Dans le triangle AQQ′ l'angle extérieur est d, et l'on a

$$d = AQQ' + AQ'Q.$$

En remplaçant ces angles par leurs valeurs trigonométriques, on a

$$\frac{AO}{f} = \frac{AO'}{q} + \frac{AO'}{q'}.$$

Or AO′ est sensiblement égal à AO, par suite de l'hypothèse des petits angles; en divisant les deux membres par AO ou AO′, il vient

$$[2\ bis] \qquad \frac{1}{f} = \frac{1}{q} + \frac{1}{q'}.$$

C'est la même équation que ci-dessus.

398. Détermination expérimentale des foyers. — On reçoit sur la lentille un faisceau solaire parallèle à l'axe principal; puis on cherche avec un écran, de l'autre côté de la lentille, le point *où va se concentrer le faisceau* : c'est là le foyer principal.

On peut aussi déduire f de l'équation aux foyers conjugués, en plaçant en un point donné la flamme d'une bougie, et en cherchant avec un écran, de l'autre côté de la lentille, son foyer conjugué : connaissant p et p', on calcule f aisément.

399. **Construction des images.** — 1° *Cas des images réelles.* — *Les images sont réelles dans le cas d'un objet lumineux* AB *placé à une distance plus grande que la distance focale principale* (fig. 399).

On réduit la construction à celle des foyers conjugués des points A et B : on mène les axes secondaires AO et BO, puis, des points A et B, des rayons parallèles à l'axe principal. Ces rayons se réfractent de manière à passer par le foyer principal F et vont former en A′ et en B′ les images des points A et B. En joignant A′B′, on a l'image de l'objet AB.

Fig. 399.

Cette image est *réelle et renversée*. Pour la voir, il faut la recevoir sur un écran blanc qui la diffuse dans toutes les directions, ou placer l'œil sur le prolongement des rayons émergents : on aperçoit ainsi, dans l'espace, une image qui, de même que dans les miroirs concaves, est une *image aérienne*.

Calcul de la grandeur et de la distance de l'image. — Les triangles ABO et A′B′O′, qui sont semblables comme équiangles, donnent

$$\frac{\text{A'B' ou I}}{\text{AB ou O}} = \frac{\text{O'P' ou } p'}{\text{OP ou } p}.$$

On a donc

$$\text{Pour la grandeur, } \mathrm{I} = \mathrm{O} \cdot \frac{p'}{p},$$

$$\text{Pour la distance, } p' = p\,\frac{f}{p-f}.$$

1° Lorsque l'objet est à une distance de la lentille égale *au double de la distance focale*, l'image est *à la même distance de l'autre côté* et *de même grandeur* que l'objet.

2° Si l'objet est à une distance plus grande que le double de la *distance focale*, l'image est plus petite que l'objet ; elle est plus *grande dans le cas contraire*.

3° *Cas particuliers.* — Lorsque l'objet coïncide avec le foyer principal, l'*image est rejetée à l'infini*, c'est-à-dire *qu'il n'y a plus d'image*. En effet, les rayons tels que AI (fig. 400) donnent, à l'émergence, un faisceau IF'OA', parallèle à l'axe secondaire AO, et ceux émis de B un faisceau parallèle à BO : il n'y a donc plus concours de rayons à aucune distance, et par suite il n'y a pas d'image.

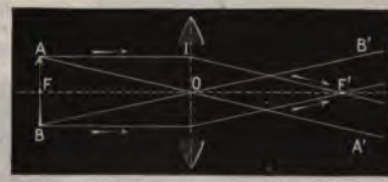


Fig. 400.

Remarque. — Pour les lentilles convergentes, comme pour les miroirs concaves, la position de l'image est toujours *réciproque* de celle de l'objet, c'est-à-dire que, si celui-ci passait en A'B', son image se formerait en AB (fig. 399).

4° *Cas des images virtuelles. — Les images sont virtuelles dans le cas d'un objet lumineux* AB *placé entre la lentille* O *et son foyer principal* F (fig. 401).

Soit un objet AB placé dans cette position : si l'on répète la construction donnée ci-dessus, on voit aisément, en considérant le trapèze AIOF, que sa petite base est AI (< OF), et, par suite, que ce sont les prolongements des rayons réfractés qui vont couper les axes secondaires OA (et OB) en A' (et B'). Les foyers A' et B' sont donc virtuels; il en est de même de tous les points de l'image. On obtient celle-ci, comme précédemment, en joignant A'B'. *Cette image virtuelle est droite et plus grande que l'objet.* On a, comme ci-dessus,

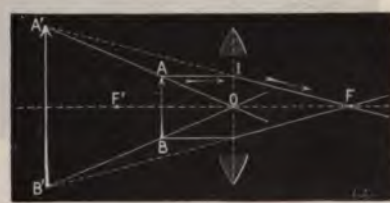


Fig. 401.

$$\frac{I}{O} = \frac{p'}{p} \quad \text{et} \quad \frac{p'}{p} = \frac{f}{f-p}.$$

400. Lentilles minces divergentes : Étude géométrique et expérimentale. — Lorsqu'un faisceau lumineux *divergent*, émané d'un point lumineux S, situé à une distance quelconque, vient tomber sur une lentille concave, celle-ci le transforme en un faisceau *encore plus divergent* (fig. 402). Cela s'explique en remarquant *que l'un quelconque des rayons* SI traverse un prisme tel que AIV, *dont la base est opposée à l'axe principal.* Il en résulte que le rayon réfracté I'R

est dévié vers le bord de la lentille et ne peut venir couper l'axe que par son prolongement; donc le foyer conjugué est nécessairement du même côté de la lentille que le point lumineux : c'est un foyer *virtuel*.

1° *Foyer principal.* — Soit d'abord un faisceau SIS_1I_1 de rayons parallèles à l'axe (fig. 403) : chacun des rayons tels que SI se réfracte au point d'incidence I en subissant une déviation *d* qui l'écarte

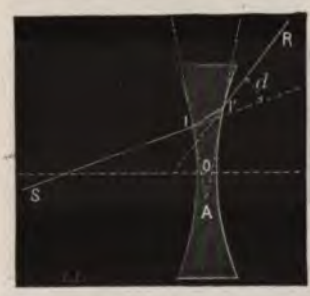


Fig. 402.

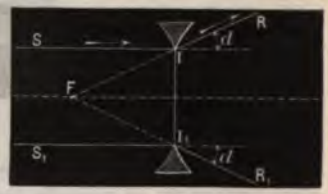


Fig. 403.

de l'axe et qui dépend de l'angle du prisme équivalant à la lentille. La même déviation étant subie par tous les rayons tels que S_1, I_1, il en résulte que les rayons, après avoir traversé la lentille, forment un faisceau divergent $FIRI_1R_1$. Les prolongements de ces rayons se rencontrent sur l'axe principal, en un point F, qui est le *foyer principal virtuel*.

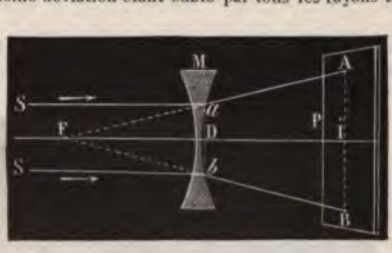


Fig. 404.

Détermination expérimentale. — On recouvre l'une des faces de la lentille biconcave de noir de fumée, en réservant, dans une même section principale et à égale distance de l'axe, en *a* et en *b* (fig. 404), deux petits cercles non noircis, qui laissent passer la lumière; puis, recevant sur l'autre face, parallèlement à l'axe, un faisceau de lumière solaire SS, on avance ou l'on recule un écran P jusqu'à ce que les rayons émergents viennent y projeter deux images A et B dont la distance soit double de *ab*. Si l'on néglige l'épaisseur de la lentille, on voit, d'après la similitude des triangles *Fab* et FAB, que l'intervalle DI est alors égal à la distance focale FD. On a, en effet,

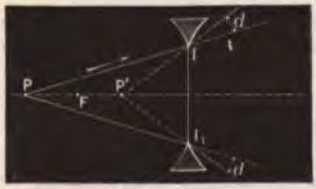


Fig. 405.

$$\frac{FD}{FI} = \frac{ab}{AB} = \frac{1}{2}.$$

2° Foyers *conjugués virtuels.* — Dans le cas où les rayons partent d'un point P (fig. 405) situé sur l'axe, on trouve, par la même construction, qu'il se forme un foyer virtuel en P', entre le foyer

principal et la lentille. La relation entre les distances des foyers conjugués devient ici

$$[1] \qquad \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}.$$

3° *Construction des images.* — Les lentilles concaves, comme les miroirs convexes, ne donnent que des images *virtuelles*, quelle que soit la distance de l'objet lumineux, pourvu que cet objet soit lui-même *réel*.

Soit, en effet, un objet AB (fig. 406) placé devant une lentille biconcave, et à une distance quelconque. Menons les *axes secondaires* AO et BO, puis un rayon AI parallèle à l'axe principal qui se réfracte deux fois, en I et en E, en s'écartant de cet axe de manière que le rayon émergent ED prolongé aille passer par le foyer principal. Le point a, où il coupe l'axe secondaire AO, est l'image vituelle du point A. L'image du point B se construisant de la même manière en b, on a en ab l'image de AB : elle est toujours *virtuelle, droite et plus petite que l'objet*. On ne peut la voir qu'en plaçant l'œil dans la direction du faisceau émergent. On a encore

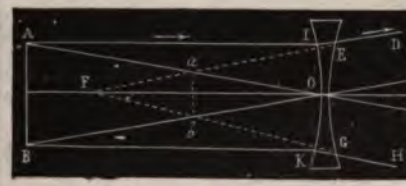


Fig. 406.

$$[2] \qquad \frac{1}{O} = \frac{p'}{p};$$

$\frac{p'}{p}$ est donné par l'équation [1].

401. Discussion algébrique de l'équation aux foyers conjugués. — La forme générale de l'*équation aux foyers conjugués*, qui répond également bien au cas des lentilles convergentes et au cas des lentilles divergentes, est

$$[1] \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

Pour la discuter commodément, on la met sous l'une des deux formes suivantes, qui s'équivalent :

$$[2] \qquad p' = p\,\frac{f}{p-f}, \qquad \text{ou} \qquad p' = \frac{f}{1-\frac{f}{p}}. \qquad [2\,bis]$$

Pour $p = \infty$ (faisceau incident parallèle à l'axe principal) on a $p' = f$
$p > 2f$ on a $p' < 2f$
$p = 2f$ on a $p' = 2f$
$p > f$ (cas d'un foyer conjugué réel) on a $p' > 0$
$p = f$ (faisceau réfracté parallèle à l'axe principal) on a $p' = \infty$
$p < f$ on a $p' < 0$.

Cette valeur négative n'est pas admissible et l'on en conclut que la formule ne s'applique plus. Or, si l'on établit directement l'équation en supposant l'image virtuelle, on trouve

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}, \qquad \textit{d'où l'on tire} \qquad p' = p\,\frac{f}{f-p}.$$

Cette dernière formule donne des valeurs positives, et par suite admissibles, de p', pour toutes les valeurs de p inférieures à f. C'est donc l'équation qui convient au cas des images virtuelles[1].

Tableau général des formules. — On peut trouver la formule qui convient à chaque cas particulier des lentilles en changeant de signe les grandeurs qui changent de sens par rapport au cas simple initial. Nous résumons dans le tableau suivant tous les cas qui peuvent se présenter.

ON PEUT LES PLACER	LENTILLES CONVERGENTES		LENTILLES DIVERGENTES	
	Images réelles	Images virtuelles	Images réelles	Images virtuelles
1° Dans un faisceau divergent. (*Cas général. — Objets réels.*)	$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$	$\frac{1}{p}-\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$	Néant	$\frac{1}{p'}-\frac{1}{p}=\frac{1}{f}$
2° Dans un faisceau convergent. (*Cas particulier. — Objets virtuels.*)	$\frac{1}{p'}-\frac{1}{p}=\frac{1}{f}$	Néant	$\frac{1}{p}-\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$	$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$

402. Aberration de sphéricité. — Un faisceau lumineux qui tombe sur une lentille, parallèlement à l'axe principal, est réfracté comme s'il tombait sur un prisme A' dont l'angle est variable et croît depuis l'axe, où il est nul, jusqu'à la périphérie, où il est maximum. Les rayons périphériques sont donc plus déviés que les rayons centraux (fig. 407) et le foyer principal G, correspondant au faisceau parallèle périphérique, est plus voisin de la lentille que le foyer principal F des rayons centraux, le seul que nous ayons considéré jusqu'ici. C'est en cela que consiste l'*aberration de sphéricité* dans les lentilles.

Fig. 407.

Elle se produit non seulement pour

1. Au lieu de partir de l'équation fondamentale $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$, on part souvent de l'équation

$$\frac{1}{p}-\frac{1}{p'}=-\frac{1}{f} \qquad \text{ou} \qquad \frac{1}{p'}-\frac{1}{p}=\frac{1}{f}.$$

On l'obtient sous cette dernière forme en convenant de regarder comme positives les grandeurs comptées à partir du centre optique vers le côté d'où vient la lumière, et comme négatives les grandeurs comptées vers l'autre côté.

es rayons parallèles, mais aussi pour les rayons divergents; mais il n'y a d'intérêt qu'à considérer la première, qu'on appelle quelquefois *aberration principale*. Il résulte de ce phénomène que l'image d'un point lumineux très éloigné n'est pas un point lumineux unique : si l'on place un écran en F, on obtient un cercle lumineux de rayon FH. Comme il en est de même pour chaque point de l'objet, on ne peut avoir de celui-ci qu'*une image confuse*.

La distance FG entre les deux foyers principaux est appelée *aberration longitudinale*; la distance FH est l'*aberration latérale*.

403. **Aplanétisme.** — 1° *Lentilles aplanétiques.* — L'expérience prouve que si l'on accole une deuxième lentille à la première, les deux foyers G et F sont rapprochés de la lentille, et celui-ci plus que celui-là : il en résulte que l'aberration est diminuée par l'interposition d'une lentille supplémentaire. En la choisissant convenablement, on peut détruire complètement l'aberration : on produit ainsi l'*aplanétisme* du système convergent, et cette lentille composée est dite *aplanétique*.

L'aplanétisme ne peut pas être obtenu avec une lentille unique; mais, en en choisissant convenablement les courbures, on peut en rendre l'aberration *minimum*. On démontre par le calcul, et l'on vérifie par l'expérience, que le minimum d'aberration est atteint, pour une lentille d'indice moyen égal à n lorsqu'on a entre ses deux rayons de courbure la relation

$$\frac{R}{R'} = n \cdot \frac{1 + 2n}{4 + n - 2n^2}.$$

Pour une lentille en crown, dont l'indice est $\frac{3}{2}$, la relation devient $R' = 6R$.

Si l'on retournait une pareille lentille, son aberration deviendrait plus de *trois fois* plus grande. Cela montre l'inconvénient qu'il peut y avoir à *retourner les verres* dans les instruments d'optique.

2° *Emploi des diaphragmes.* — On peut atténuer l'aberration des lentilles ordinaires en plaçant devant leur surface des diaphragmes percés d'une ouverture centrale : de cette manière on laisse passer les rayons voisins du centre, et l'on arrête ceux qui tendent à se réfracter vers les bords. On se rapproche ainsi plus ou moins du cas des rayons centraux, et l'on évite l'aberration.

3° *Emploi des lentilles à échelons.* — On obtient un aplanétisme très suffisant dans la pratique par l'emploi des lentilles dites *à échelons*.

404. **Lentilles à échelons.** — Les *lentilles à échelons* suppriment les inconvénients des lentilles de grande ouverture, en particulier leur forte *aberration de sphéricité* et leur pouvoir absorbant, qui est fonction de leur épaisseur, et la cherté de leur construction. Imaginées par Buffon, elles ont été perfectionnées par Fresnel.

Elles sont formées d'une lentille plan-convexe C (fig. 408 et 409), encastrée dans une première série d'anneaux de verre, qui en constituent la partie centrale, et entourée d'une suite d'anneaux de verre A, B..., également plan-convexes, qui en constituent la périphérie. Chacun de ces anneaux a sa face plane située du même côté que la face plane de la lentille centrale, tandis que leurs faces opposées ont une courbure telle, que leurs divers foyers viennent se former au foyer de la lentille.

Fig. 408.

D'après Buffon, les anneaux sphériques de la périphérie devaient être *concentriques* à la portion centrale; mais Fresnel a prouvé que le système n'est aplanétique qu'à la condition que les arcs générateurs des anneaux n'aient pas le même centre[1].

1. *Les différents centres ne doivent* même pas être situés sur l'axe de la len-

Phares de Fresnel ou *Phares catadioptriques.* — Ce sont les lentilles de Fresnel qui constituent l'organe essentiel des phares actuels. — Le *feu*, c'est-à-dire la source lumineuse, était jadis une forte lampe à quatre ou cinq mèches concentriques (fig. 409). On la remplace aujourd'hui, autant que possible, par un arc voltaïque. Il est placé au foyer principal d'une lentille à échelons, en sorte que le faisceau émergent est parallèle, et comme il n'est affaibli que par l'absorption atmosphérique, il peut être visible jusqu'à une très grande distance. Pour que tous les points de l'horizon soient successivement éclairés, la lentille se meut autour de la lampe, au moyen d'un mécanisme d'horlogerie, et fait sa révolution en un temps qui varie d'un phare à un autre. Il en résulte que pour un même point de l'horizon il y a successivement apparition et éclipse de lumière à des intervalles égaux. Ces éclipses intermittentes servent à distinguer les phares entre eux ou bien d'avec un feu accidentel.

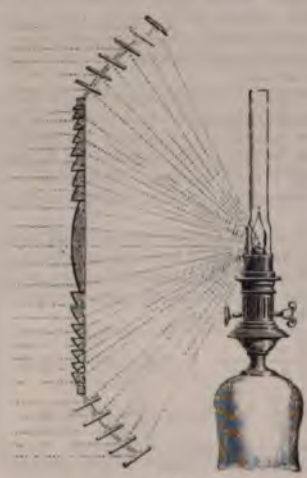


Fig. 409.

Le phare (fig. 409) est dit *catadioptrique*, lorsque la réflexion est utilisée en même temps que la réfraction, pour en augmenter la puissance. On voit, autour de la lentille proprement dite, une série de miroirs plans, disposés en éventail, qui réfléchissent horizontalement les rayons lumineux les plus divergents, de manière à renforcer les faisceaux émergents.

405. Aberrations dues à l'épaisseur des lentilles. — Il se produit, dans la réfraction de la lumière par les lentilles un peu épaisses, une autre aberration, qui est due à leur épaisseur. Gauss a étudié cette perturbation et il a établi de nouvelles formules qui permettent de construire les images fournies par les lentilles et d'en calculer les éléments *en tenant compte de l'épaisseur*. C'est ce qu'on appelle la *théorie des lentilles épaisses* de Gauss. Nous allons en donner une idée et indiquer quelques-uns de ses résultats fondamentaux, en nous bornant d'ailleurs au cas des *rayons centraux*.

406. Notions sur les lentilles épaisses. — Théorie des rayons centraux. — . *Réfraction de la lumière par un milieu indéfini à surface réfringente con-*

tille. Ils s'en éloignent d'autant plus que les arcs auxquels ils appartiennent sont eux-mêmes plus éloignés du centre de la lentille. Il en résulte que ces arcs générateurs, en tournant autour de l'axe, n'engendrent pas des portions *de surfaces sphériques concentriques*, mais des portions de surfaces dites *annulaires*.

vexe. — Supposons que la lumière passe de l'air dans un milieu plus réfringent, tel que le verre, limité d'un côté par une surface sphérique convexe, et illimité d'autre part.

Soit P un point lumineux situé sur l'axe principal de la surface (fig. 410); soit PO un rayon lumineux normal à la surface, et qui y pénètre sans déviation; PI un autre rayon lumineux quelconque, qui se réfracte suivant IP'_1 : le point P'_1 où se coupent les deux rayons réfractés est l'*image* ou le *foyer conjugué* du point P. Cherchons une relation entre les distances $OP = p$ et $OP'_1 = p'_1$ (comptées en valeur absolue comme dans les calculs précédents).

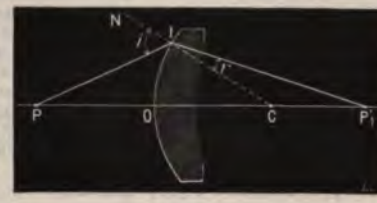


Fig. 410.

Les deux triangles ICP et ICP'_1, qui ont même sommet I et leurs bases situées sur la même droite, ont par suite même hauteur : leurs surfaces sont donc entre elles comme leurs bases. On a donc

$$[1] \qquad \frac{\text{surf. ICP}}{\text{surf. ICP}'_1} = \frac{\text{CP}}{\text{CP}'_1} = \frac{p + \text{R}}{p'_1 - \text{R}}.$$

D'autre part, on peut exprimer les surfaces de ces triangles en fonction de leurs angles au sommet et du produit des côtés adjacents. On a

$$\text{surf. ICP} = \frac{1}{2}(\text{IP} \,.\, \text{IC} \,.\, \sin \text{PIC}) = \frac{1}{2}(p\ \text{R} \sin i).$$

On aura de même

$$\text{surf. ICP}'_1 = \frac{1}{2}(p'_1\ \text{R} \sin r)$$

et, en divisant ces égalités membre à membre, et en simplifiant, il vient

$$[2] \qquad \frac{\text{surf. ICP}}{\text{surf. ICP}'_1} = n\,\frac{p}{p'_1}.$$

En comparant les équations [1] et [2], on en déduit l'égalité

$$[a] \qquad \frac{p + \text{R}}{p'_1 - \text{R}} = n\,\frac{p}{p'_1};$$

d'où

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'_1} = (n - 1)\,\frac{1}{\text{R}}.$$

Telle est l'*équation aux foyers conjugués*, dans le cas où nous nous sommes placés.

Fig. 411.

II. *Réfraction de la lumière par un milieu indéfini à surface réfringente concave.* — Supposons que le point lumineux, au lieu d'être réel, soit un point *lumineux virtuel, tel que P'_1 (fig. 411).* C'est, par exemple, le sommet d'un fais-

ceau convergent qui serait arrêté dans sa marche par une surface concave de verre, le séparant de l'air extérieur.

Parmi les rayons lumineux qui composent ce faisceau convergent, il en est un, tel que OO', qui tombe normalement sur la surface concave : celui-ci poursuit sa route sans déviation suivant $O'P'_1$. Considérons un autre rayon incident quelconque tel que IP'_1 : il tombe en I' sur la surface concave, en faisant un angle d'incidence que nous appellerons r' (par analogie avec les prismes), et il sort du verre en faisant un angle de réfraction que nous appellerons i'. L'angle i' étant plus grand que r', le rayon réfracté vient couper l'axe principal en un point P' plus rapproché que le point P'_1 : ce point P' est le foyer conjugué *réel* du point lumineux virtuel P'_1. Cherchons l'équation aux foyers conjugués de ces deux points.

Soit p_1 la distance $O'P'_1$ et p' la distance $O'P'$, *comptées positivement*, en valeurs absolues, suivant nos conventions précédentes. Considérons encore les deux triangles $I'C'P'_1$ et $I'C'P'$ qui ont même sommet I' et même hauteur. Ils donnent, comme ci-dessus,

$$[1] \qquad \frac{\text{surf. } I'C'P'_1}{\text{surf. } I'C'P'} = \frac{C'P'_1}{C'P'} = \frac{C'O' + O'P'_1}{C'O' + O'P'} = \frac{R' + p_1}{R' + p'}.$$

On a, de même, en appliquant la formule trigonométrique de la surface,

$$[2] \qquad \frac{\text{surf. } I'C'P'_1}{\text{surf. } I'C'P'} = \frac{I'C' \times I'P'_1 \times \sin P'_1 I'C'}{I'C' \times I'P' \times \sin P'I'C'} = \frac{R'.p_1 \sin r'}{R'.p' \sin i'} = \frac{p_1}{p'} \cdot \frac{1}{n}.$$

En comparant les égalités [1] et [2], il vient, toutes réductions faites,

$$b] \qquad -\frac{n}{p_1} + \frac{1}{p'} = (n-1)\frac{1}{R'}.$$

C'est l'*équation aux foyers conjugués*, dans le cas où nous nous sommes placés.

III. *Réfraction de la lumière par une lentille épaisse. — Équation aux foyers conjugués.* — Soit maintenant une lentille épaisse OO' (fig. 411), P un point lumineux situé sur son axe principal. Cherchons le foyer conjugué P'.

Le rayon normal PO traverse la lentille sans déviation suivant OO' et sort suivant O'P'. Il suffit de trouver un autre rayon réfracté. Considérons un rayon incident quelconque tel que PI. Il subit une première réfraction suivant IP' qui est définie par l'équation

$$[a] \qquad \frac{1}{p} + \frac{n}{p'_1} = (n-1)\frac{1}{R}.$$

De même, la deuxième face de la lentille fait subir au rayon IP' une seconde réfraction, de manière que le rayon émerge suivant I'P', et vienne couper l'axe en un point P' qui est l'*image* ou le *foyer conjugué* du point P. Cette seconde réfraction est déterminée par l'équation

$$[b] \qquad -\frac{n}{p_1} + \frac{1}{p'} = (n-1)\frac{1}{R'}.$$

On a de plus entre les inconnues auxiliaires p_1 et p'_1 et l'épaisseur e de la lentille la relation

$$[c] \qquad p'_1 = p_1 + e.$$

On peut donc éliminer entre les trois équations [a], [b] et [c] les inconnues

auxiliaires p_1 et p'_1 et il restera une relation entre p, p' et les éléments de la lentille épaisse (e, n, R et R'), qui sera l'*équation aux foyers conjugués*.

Remarque. — *Application aux lentilles minces.* — Les équations [a] et [b] peuvent se transformer de la manière suivante (après élimination de p'_1) :

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p_1 + e} = \frac{n-1}{R}, \qquad \frac{1}{p'} + \frac{n}{p_1} = \frac{n-1}{R'}.$$

Si nous faisons la somme de ces égalités membre à membre, en supposant e négligeable, les deux termes en p_1 s'annuleront dans la somme, et il viendra

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = (n-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right).$$

C'est l'équation aux foyers conjugués des *lentilles minces*.

407. **Points nodaux.** — *Rayons sans déviation.* — Dans une lentille épaisse, il y a toujours un *centre optique*. Mais si le rayon lumineux qui passe par le centre optique ne subit pas de déviation, il subit un *déplacement*. Par conséquent, un point lumineux tel que Q, situé en dehors de l'axe principal de la lentille épaisse (fig. 412), ne possède pas d'*axe secondaire proprement dit* toutefois il existe toujours une direction d'incidence à laquelle correspond un rayon émergent *parallèle*. On peut construire cette direction au moyen des *points nodaux*.

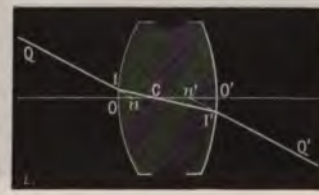


Fig. 412.

1° *Définition.* — On appelle *points nodaux* les foyers conjugués n et n' du centre optique de la lentille par rapport à ses deux surfaces réfringentes IO et I'O'.

Soit QII'Q' le rayon lumineux émané du point Q, qui émerge *sans déviation*, en passant par le centre optique C de la lentille épaisse (fig. 412). Soient n et n' les points où l'axe principal est coupé par les prolongements des rayons QI et Q'I'. Nous allons démontrer que les points n et n sont les *points nodaux* ci-dessus définis.

Cherchons, en effet, quel serait le foyer conjugué par rapport à la surface réfringente OI d'un point lumineux qui serait placé en C. Le rayon, dirigé suivant l'axe principal O'O, traverse la surface sans déviation : donc le foyer conjugué de C est sur cette ligne. Il suffit d'avoir un autre rayon réfracté, correspondant à un rayon incident émané de C. Or, d'après le principe *du retour inverse des rayons*, puisque IC est, par construction, la direction de réfraction qui correspond à la direction d'incidence QI, inversement le rayon réfracté dans l'air qui correspond au rayon incident CI dans le verre, est précisément IQ. Ce rayon coupe, par son prolongement, l'axe principal en n : donc n est le foyer conjugué de C par rapport à la surface OI.

On démontrerait de la même manière que n' est le foyer conjugué de C par rapport à la surface réfringente O'I'. Donc les deux points n et n' sont des points invariables, comme le centre optique lui-même : on pourrait d'ailleurs les déterminer à l'aide des équations aux foyers conjugués [a] et [b] (2°).

2° *Propriété des points nodaux.* — Tout rayon, tel que QII'Q', qui, dans son passage à travers la lentille, coupe l'axe au centre optique, est un rayon qui sort parallèlement à lui-*même*. *Cela* est une propriété du centre optique. En *outre ce rayon est tel, que les prolongements* de ses deux parties extérieures

passent par les deux *points nodaux* : cela est la propriété caractéristique des *points nodaux*.

6° *Construction du rayon sans déviation.* — Le rayon, tel que QII'Q', joue par rapport aux points lumineux tels que Q', extérieurs à l'axe principal, le même rôle dans le cas des lentilles épaisses que l'axe secondaire dans les lentilles minces. C'est sur ce *rayon sans déviation* que doit se trouver le foyer conjugué Q'.

On le construira aisément à l'aide du centre optique C et des points nodaux. On commencera par placer les points C, n et n' sur l'axe principal, ce qui sera facile, étant données la définition du point C et les équations aux foyers conjugués [a] et [b]. Joignons le point Q au premier point nodal n : la direction Qn est évidemment celle du rayon incident; joignons le point I au point C, et prolongeons jusqu'à l'intersection I' avec la deuxième face de la lentille : la direction ICI' est évidemment le trajet du rayon dans l'épaisseur de la lentille; enfin, joignons n'I' et prolongeons à l'extérieur; cette direction I'Q' est évidemment le rayon émergent. C'est sur cette direction que doit se trouver le foyer conjugué du point Q.

408. **Plans principaux.** — Un rayon incident PI, parallèle à l'axe, se réfracte suivant II'$_1$F$_1$ (fig. 415). Les rayons incident et émergent prolongés se coupent

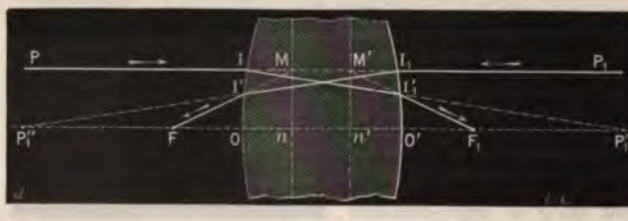


Fig. 415.

en M'. Soit M'n' une perpendiculaire abaissée de M' sur l'axe. Les deux groupes de triangles semblables P'$_1$OI (I est supposé voisin de O) et P'$_1$O'P$_1$, F$_1$O'I'$_1$ et F$_1$M'n' donnent respectivement

$$\frac{IO}{I'O'} = \frac{OP'_1}{O'P'_1}, \qquad \frac{M'n' \text{ ou } I'O}{I'_1O'} = \frac{n'F_1}{O'F_1};$$

donc

$$[1] \qquad \frac{OP'_1}{O'P'_1} = \frac{n'F_1}{O'F_1}.$$

Les points O, O' sont fixes comme sommets de la lentille, P'$_1$ est l'un des foyers principaux relatifs à la face O; donc le point F$_1$ conjugué de P'$_1$ par rapport à la seconde face O' est fixe comme P'$_1$. L'équation [1] exprime donc que le point n' est lui-même invariable lorsqu'on fait varier IO.

Les points d'intersection M' des rayons incidents parallèles à l'axe et des rayons émergents sont donc tous situés dans le plan n'M', qui a reçu le nom de *plan principal d'émergence*. Il existe évidemment un *plan principal d'incidence* jouissant de la même propriété par rapport aux rayons qui émergent parallèlement à l'axe.

En joignant à l'équation [1] la condition [b] qui exprime la conjugaison de P'$_1$ *et F$_1$ par rapport à la face* O' et la valeur de la distance focale O'P'$_1$ (456), on *calcule aisément la* distance focale principale n'F$_1$.

On opère de même pour obtenir nF.

Si la lentille est baignée sur ses deux faces par un même milieu, *ce que nous supposerons dans tout ce qui suit*, on trouve que les deux segments $n'F_1$ et nF sont égaux.

Il est clair que les deux points tels que M et M', situés à la même hauteur dans les deux plans principaux, sont conjugués.

En effet, on peut considérer les deux rayons P_1M', F_1M' comme résultant de la réfraction des rayons PM, FM partis de M.

En particulier, les points n et n' sont conjugués.

Remarque. — Les points nodaux, dont il a été déjà question, coïncident avec les points n et n'.

Fig. 414.

Considérons en effet un rayon quelconque AN se dirigeant sur n, il passera par n' après réfraction, puisque n et n' sont deux points conjugués (fig. 414). Il est facile de trouver la direction du rayon émergent. En effet, An rencontre le plan focal F en N, le rayon NQ se réfracte suivant QF' : donc An se réfracte suivant n'R, parallèle à QF' (les rayons Nn, NQ sont issus d'un même point N du plan focal F).

Or, les segments nF et n'F' étant égaux, QF' est parallèle à An : donc le rayon n'R émerge parallèlement à sa direction d'incidence An.

Fig. 415.

Construction des images. — La construction de l'image d'un point A est très simple, puisque celle-ci est à l'intersection de la ligne n'A', parallèle à An, et de MF'A', le point M étant obtenu en menant par A une parallèle à l'axe jusqu'à sa rencontre avec le plan principal d'émergence n' (fig. 415).

AFN' est un troisième rayon remarquable qui peut être aussi utilisé.

Les triangles semblables AM'N', FnN' donnent

$$\frac{M'N'}{nN'} = \frac{AM'}{Fn} \quad \text{ou} \quad \frac{AB + A'B'}{A'B'} = \frac{AM'}{Fn}. \qquad [2]$$

Les triangles semblables A'NM, F'n'M donnent d'autre part

$$\frac{MN \text{ ou } M'N'}{Mn'} = \frac{A'N}{F'n'} \quad \text{ou} \quad \frac{AB + A'B'}{AB} = \frac{A'N}{F'n' \text{ ou } Fn}, \qquad [3]$$

es deux distances focales étant égales.

Les équations [2] et [3] peuvent s'écrire

$$\frac{A'B'}{AB + A'B'} = \frac{Fn}{AM'}, \qquad \frac{AB}{AB + A'B'} = \frac{Fn}{A'N};$$

donc, en ajoutant, il vient

$$1 = \frac{Fn}{Am'} + \frac{Fn}{A'n} \quad \text{ou} \quad 1 = \frac{f}{p} + \frac{f'}{p'},$$

formule semblable *à celle des lentilles minces* (p. 457); ici f et f' ont la même *valeur absolue, puisque les milieux extrêmes* sont supposés identiques.

En résumé, à la condition de dédoubler l'origine et de prendre respectivement les points n et n' pour origine des segments d'incidence et des segments d'émergence, les formules et les constructions établies pour les lentilles minces s'appliquent sans modification aux lentilles épaisses considérées.

CHAPITRE IV

CHROMATIQUE[1]

—

DISPERSION ET ACHROMATISME. — ANALYSE SPECTRALE.

409. Décomposition de la lumière blanche. — Spectre solaire. — Le phénomène de la réfraction n'est pas aussi simple qu'on l'a supposé jusqu'ici : quand la lumière qui passe d'un milieu dans un autre est la lumière *blanche*, provenant du soleil ou d'un corps solide incandescent, il n'y a pas seulement déviation, mais *décom-*

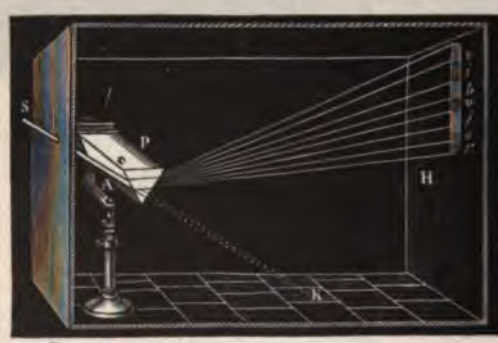


Fig. 416.

position de cette lumière blanche *en plusieurs espèces de lumières diversement colorées*. Ce phénomène, découvert et étudié par Newton, est désigné sous le nom de *dispersion*.

1° *Expérience fondamentale.* — On reçoit dans une chambre

1. De χρῶμα, couleur. Partie de l'optique où l'on étudie les couleurs du spectre solaire.

obscure un faisceau solaire SA (fig. 416) à travers une petite ouverture pratiquée dans le volet. Ce faisceau tend à aller former en K une image ronde et blanche du soleil; mais si l'on interpose sur son passage un prisme de flint-glass P, disposé horizontalement, le faisceau, à l'entrée et à la sortie du prisme, se réfracte dans un plan vertical, et donne sur un écran éloigné, au lieu d'une image ronde et blanche, une image H, de même dimension horizontale, mais allongée dans le sens vertical, et *colorée des teintes de l'arc-en-ciel*. Newton a donné à cette image le nom de *spectre solaire*.

Il existe, en réalité, dans le spectre une infinité de teintes; mais on n'en distingue nettement que sept principales, qui se succèdent dans l'ordre suivant :

violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge,

en commençant par la teinte la plus déviée (fig. 1, planches coloriées I et II). Ces couleurs n'occupent pas toutes la même étendue dans le spectre; c'est le violet qui est le plus étalé, et l'orangé qui l'est le moins.

2° *Calcul de la dispersion.* — La *dispersion* proprement dite est égale à la *différence* des déviations subies par les deux rayons extrêmes. Soient δ la dispersion, D_v la déviation du violet et D_r celle du rouge par un prisme d'angle A, n_v et n_r les indices du violet et du rouge; on a, en appliquant la formule des prismes de petite ouverture (395),

$$\delta = D_v - D_r = A(n_v - 1) - A(n_r - 1) = A(n_v - n_r).$$

La dispersion n'est donc pas *égale*, mais *proportionnelle* à la variation d'indices pour les couleurs extrêmes.

Cette formule montre aussi que la *dispersion* est *proportionnelle à l'angle réfringent* du prisme, et, par suite, que l'*étendue du spectre* est *proportionnelle au pouvoir dispersif* de la substance réfringente[1].

3° *Spectres des lumières artificielles.* — Dans les spectres des lumières artificielles, on n'observe pas d'autres couleurs que celles du spectre solaire, et leur ordre est le même; mais, en général, il en manque quelques-unes. Leur intensité relative est également très modifiée. La nuance qui domine dans une flamme artificielle est aussi celle qui domine dans son spectre. Les flammes jaunes, rouges, vertes, donnent des spectres où la teinte dominante est le jaune, le rouge, le vert.

410. Production d'un spectre pur. — Règle de Newton. — Un spectre est d'autant plus *pur* que les faisceaux colorés

1. Pour le flint-glass, la *dispersion* est 0,0433; pour le crown-glass, elle est de *0,0218, c'est-à-dire environ moitié de la* précédente.

sont mieux séparés. On obtient un spectre assez pur en recevant les rayons solaires par une fente parallèle à l'arête réfringente du prisme, en plaçant celui-ci très près de la fente et l'écran assez loin, à une distance d'environ 5 ou 6 mètres. On obtient une épuration du spectre plus complète en appliquant la *règle de Newton* :

La lumière étant reçue par une fente mince, parallèle à l'arête réfringente du prisme, on interpose sur le trajet des rayons incidents (en deçà ou au delà du prisme) une lentille achromatique, à une distance de la fente égale à 2 f; on place l'écran de l'autre côté de la lentille, et à la même distance 2 f; enfin, on a soin d'orienter le prisme dans la position de la déviation minimum.

411. **Les couleurs du spectre sont simples et inégalement réfrangibles.** — Si l'on isole une des couleurs du spectre en interceptant les autres au moyen d'un écran E (fig. 417), et qu'on la fasse passer à travers un second prisme B, on observe encore

Fig. 417.

une déviation, mais plus de *dispersion* : ce rayon isolé garde la même couleur. On en conclut que les couleurs du spectre sont *simples*, c'est-à-dire *indécomposables par le prisme*.

De plus, les couleurs du spectre sont inégalement *réfrangibles*. La forme allongée du spectre suffirait pour le démontrer; mais on peut le faire directement par un grand nombre d'expériences. Nous décrirons en particulier celle des *prismes croisés*.

Expérience des prismes croisés. — Sur un premier prisme A (fig. 418), disposé horizontalement, on reçoit un faisceau de lumière blanche S, qui va former un spectre vertical *rv* sur un écran éloigné. Si l'on place alors verticalement un second prisme B derrière le premier, de manière qu'il soit lui-même traversé par le faisceau réfracté, le spectre est déplacé sur le côté du prisme vertical; mais, au lieu de l'être parallèlement à lui-même, comme *cela* aurait lieu si toutes les couleurs du spectre étaient réfractées *également, il est rejeté* obliquement en r'v' : donc, en allant du *rouge au violet, les* couleurs sont de plus en plus réfrangibles.

Imp. Bajeman, 49, rue de

HACHETTE et Cie, Paris

Ainsi l'indice de réfraction varie pour chaque couleur et même pour les rayons d'une même couleur. Dans la zone rouge, par exemple, les rayons qui forment l'extrémité du spectre sont moins réfractés que ceux qui sont voisins de la zone orangée.

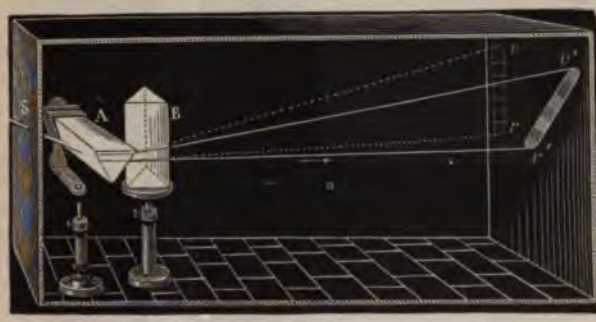


Fig. 418.

Aussi est-on convenu de prendre pour indice d'une substance l'indice moyen du jaune dans le spectre donné par cette substance.

412. Recomposition de la lumière blanche. — Après avoir décomposé la lumière blanche, il restait à vérifier qu'on pouvait la recomposer. Cela peut se faire par plusieurs procédés.

1° *Prismes inverses.* — Si l'on reçoit le spectre sur un second prisme de même angle réfringent que le premier, mais tourné

Fig. 419.

Fig. 420.

en sens contraire (fig. 419), le second annule la dispersion du premier, et l'on obtient un faisceau émergent E, parallèle au faisceau incident et *blanc*. Tout se passe comme si le faisceau incident avait traversé une lame à faces parallèles, formée par la juxtaposition des deux prismes.

2° *Lentille convergente.* — On reçoit le spectre sur une lentille biconvexe (fig. 420) et, plaçant un écran blanc à son foyer, on y recueille une image blanche du soleil.

3° *Miroir concave.* — On fait tomber le spectre sur un miroir concave (fig. 421) ; en plaçant au foyer un écran de verre dépoli, on recueille une image blanche.

Fig. 421.

4° *Sept miroirs plans.* — On reçoit les sept couleurs du spectre respectivement sur sept miroirs de verre, à faces bien parallèles, et pouvant s'incliner en tous sens (fig. 422). En dirigeant convenablement ces miroirs, on fait d'abord tomber, sur le plafond par exemple, les sept faisceaux réfléchis, qui y donnent sept images distinctes, rouge, orangée, jaune, etc. ; puis, dirigeant les miroirs de ma-

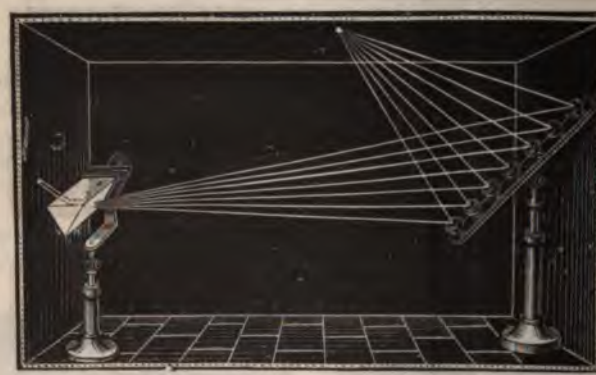


Fig. 422.

nière que les sept images viennent se superposer exactement, on obtient une image unique, qui est blanche.

5° *Disque de Newton.* — Enfin, on peut produire la sensation de la lumière blanche au moyen du disque coloré de Newton. C'est un disque de carton de 30 centimètres de diamètre environ ; le *centre et les bords* sont noirs, et dans l'intervalle sont collées des *bandes de papier* rouges, orangées, jaunes, vertes, bleues, indigo *et violettes,* allant du centre à la circonférence, de manière à

HACHETTE et Cie Paris.

réaliser cinq spectres circulaires successifs (fig. 423). Si l'on imprime à ce disque un mouvement de rotation rapide, la rétine reçoit, presque simultanément, l'impression des sept couleurs du

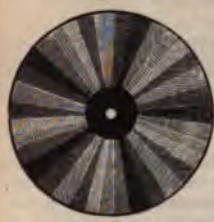


Fig. 423.

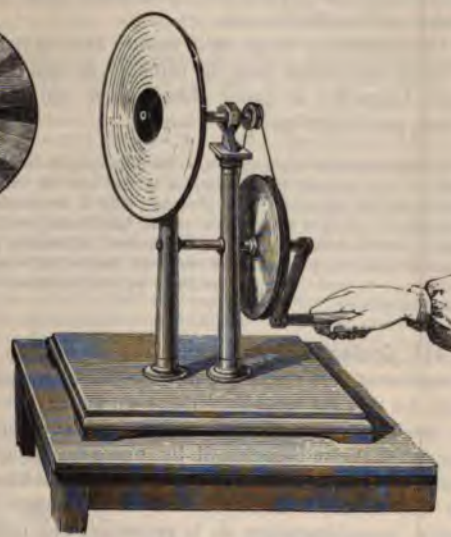


Fig. 424.

spectre, et le disque paraît blanc (fig. 424), ou du moins d'un blanc gris, car les couleurs qui le recouvrent ne sont pas exactement celles du spectre.

413. **Composition de la lumière et Couleur des corps : Théorie de Newton.** — De ces diverses expériences Newton tira deux conclusions :

1° La lumière blanche n'est pas homogène, mais formée de sept lumières *simples* et *inégalement réfrangibles* : c'est ce qu'il nomma les couleurs *simples* ou *primitives*.

2° C'est en vertu de leur *différence de réfrangibilité* que ces couleurs simples se séparent en traversant le prisme.

D'après Newton, les corps décomposeraient aussi la lumière par réflexion, et leur couleur propre ne dépendrait que de leur pouvoir réflecteur pour les différentes couleurs simples. Ceux qui les réfléchissent toutes, dans les proportions qu'elles ont dans le spectre, paraissent *blancs* ; ceux qui les absorbent toutes sont

lumineux : **Pouvoir lumineux des divers faisceaux du spectre.** — Draper. — D'après les expériences de Fraünhofer et d'Herschel, *ogne* qu'a lieu le maximum d'intensité de la lumière, et c'est dans lieu le minimum.

ion de la partie visible du spectre varie avec la température de lumière : c'est ce que montre l'expérience suivante de M. Draper. passer dans un fil de platine un courant électrique dont on ivement l'intensité, le fil s'échauffe de plus en plus et commence lumineux vers 500°. Or, si l'on analyse, à l'aide d'un prisme, la par ce fil, on n'obtient d'abord que des rayons rouges; mais, courant continuant à croître, le fil s'échauffe davantage, et à la on voit apparaître l'orangé. Au fur et à mesure que la tempéra- lève, après l'orangé se montre le jaune, puis le vert, le bleu, l'in violet, lorsque le platine est chauffé *à blanc*.

calorifique. — Lorsqu'on reçoit un faisceau de lumière solaire d'une substance parfaitement *diathermane* (c'est-à-dire *transpa- chaleur*), telle que le sel gemme, les rayons calorifiques obscurs comme les rayons lumineux, perpendiculairement aux arêtes du ment ainsi un *spectre calorifique*.

ence prouve que la chaleur, comme la lumière, est composée de de rayons inégalement réfrangibles. On les met en évidence à *moscope* très sensible, tel qu'une *pince thermo-électrique*.

du spectre calorifique. — Sur la droite AV (fig. 425) on porte une portionnelle à l'éten- la radiation calori- spectre, et sur cette des perpendiculaires les aux intensités ca- chaque point. M. Mul- rg, a obtenu ainsi la la partie VCR corres- ation calorifique dans ble, du violet jusqu'au partie noire RCBA à la même radiation dans la région infra- que le maximum de chaleur a lieu en B, bien en deçà du rouge, due totale du spectre calorifique est presque égale à celle du eux.

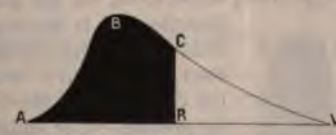


Fig. 425.

rration de réfrangibilité. — Les lentilles, réfractant comme des prismes, doivent aussi la décomposer. Il que les images qu'elles nt irisées sur leur con- faut se désigne sous le *ration de réfrangibilité*. lentille convergente, e, reçoit un faisceau de anche, parallèle à son al, les rayons rouges, les moins réfrangibles, r leur foyer principal *en un* point *r* (fig. 426), tandis *ons violets vont concourir* en un point *v*, plus rap-

Fig. 426.

noirs. Entre ces deux limites extrêmes se présentent une infinité de nuances, déterminées par la proportion des rayons simples réfléchis ou éteints par chaque corps. Par conséquent, les corps ne seraient pas colorés par eux-mêmes, mais par l'espèce de lumière qu'ils réfléchissent.

La couleur des corps varie encore avec la nature de la lumière. C'est ce qui arrive pour la lumière du gaz et celle des bougies, dans lesquelles le jaune domine, et qui communiquent cette teinte aux objets qu'elles éclairent.

Analyse physique des couleurs. — On découpe une bandelette étroite du corps dont on veut analyser la couleur, on la fixe sur un fond noir et on l'éclaire fortement. En regardant, à la distance d'un à deux mètres, avec un prisme, la lumière réfléchie ou diffusée par la bandelette, on la décompose, et l'on analyse les couleurs simples qui composent la couleur propre du corps. On a constaté ainsi que *pour tous les corps la couleur est composée*. Les pétales des fleurs, par exemple, donnent toujours un spectre nuancé de plusieurs des couleurs du spectre.

414. **Couleurs complémentaires.** — Newton a nommé *couleurs complémentaires* celles qui forment du blanc par leur superposition. Le vert est complémentaire du rouge, le bleu de l'orangé, le violet du jaune. Toute couleur a sa couleur complémentaire; car, n'étant pas blanche, il lui manque quelques-unes des couleurs du spectre pour former de la lumière blanche ; le mélange de ces dernières couleurs doit donc donner une couleur composée, complémentaire de la première. Les couleurs complémentaires peuvent donc être elles-mêmes simples ou composées.

415. **Constitution du spectre solaire : Spectres lumineux, calorifique et chimique.** — Newton n'a connu du spectre que la partie colorée, la partie visible. Or la radiation qui constitue le spectre possède beaucoup plus d'étendue, et se compose en réalité de trois parties distinctes : 1° des rayons lumineux qui, agissant sur la rétine, constituent le spectre proprement dit; 2° en deçà du rouge, des rayons impropres à exciter la vision, mais possédant une puissance calorifique beaucoup plus grande que les autres parties du spectre : ce sont les *rayons calorifiques* ou *infrarouges*, constituant le *spectre calorifique*; 3° au delà du violet, des rayons encore impropres à la vision, comme les rayons en deçà du rouge, d'un pouvoir calorifique très faible, mais doués d'une grande énergie chimique : ce sont les *rayons chimiques* ou *ultraviolets*; ils constituent le *spectre chimique*. Il y a donc dans la lumière blanche trois espèces de radiations, *lumineuses, calorifiques et chimiques*, que l'on peut, plus ou moins, séparer à l'aide des prismes.

416. **Spectre lumineux : Pouvoir lumineux des divers faisceaux du spectre. — Expérience de Draper.** — D'après les expériences de Fraünhofer et d'Herschel, c'est dans le *jaune* qu'a lieu le maximum d'intensité de la lumière, et c'est dans le *violet* qu'a lieu le minimum.

La composition de la partie visible du spectre varie avec la température de la source de lumière : c'est ce que montre l'expérience suivante de M. Draper. Lorsqu'on fait passer dans un fil de platine un courant électrique dont on accroît successivement l'intensité, le fil s'échauffe de plus en plus et commence à devenir lumineux vers 500°. Or, si l'on analyse, à l'aide d'un prisme, la lumière émise par ce fil, on n'obtient d'abord que des rayons rouges; mais, l'intensité du courant continuant à croître, le fil s'échauffe davantage, et à la suite du rouge on voit apparaître l'orangé. Au fur et à mesure que la température du fil s'élève, après l'orangé se montre le jaune, puis le vert, le bleu, l'indigo et enfin le violet, lorsque le platine est chauffé *à blanc*.

417. **Spectre calorifique.** — Lorsqu'on reçoit un faisceau de lumière solaire sur un prisme d'une substance parfaitement *diathermane* (c'est-à-dire *transparente pour la chaleur*), telle que le sel gemme, les rayons calorifiques obscurs s'épanouissent, comme les rayons lumineux, perpendiculairement aux arêtes du prisme, et forment ainsi un *spectre calorifique*.

Cette expérience prouve que la chaleur, comme la lumière, est composée de plusieurs espèces de rayons inégalement réfrangibles. On les met en évidence à l'aide d'un *thermoscope* très sensible, tel qu'une *pince thermo-électrique*.

Figuration du spectre calorifique. — Sur la droite AV (fig. 425) on porte une longueur proportionnelle à l'étendue totale de la radiation calorifique dans le spectre, et sur cette droite on élève des perpendiculaires proportionnelles aux intensités calorifiques en chaque point. M. Muller, de Fribourg, a obtenu ainsi la courbe ABCV : la partie VCR correspond à la radiation calorifique dans le spectre visible, du violet jusqu'au rouge, et la partie noire RCBA à la même radiation dans la région infrarouge. On voit que le maximum de chaleur a lieu en B, bien en deçà du rouge, et que l'étendue totale du spectre calorifique est presque égale à celle du spectre lumineux.

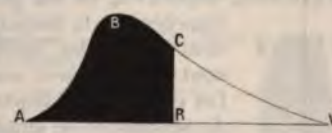


Fig. 425.

418. **Aberration de réfrangibilité.** — Les lentilles, réfractant la lumière comme des prismes, doivent aussi la décomposer. Il en résulte que les images qu'elles donnent sont irisées sur leur contour. Ce défaut se désigne sous le nom d'*aberration de réfrangibilité*. Lorsqu'une lentille convergente, par exemple, reçoit un faisceau de lumière blanche, parallèle à son axe principal, les rayons rouges, qui sont les moins réfrangibles, vont *former leur foyer principal en* un point r (fig. 426), tandis *que les rayons violets vont concourir* en un point v, plus rap-

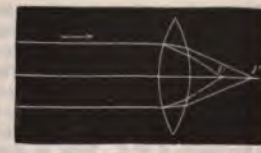


Fig. 426.

proché. Entre ces deux limites se forment les foyers orangé, jaune, vert, bleu et indigo. L'aberration de réfrangibilité est d'autant plus sensible que les lentilles sont plus convergentes et que les rayons incidents sont plus éloignés de l'axe.

419. **Effet d'aberration de réfrangibilité : Irisation des objets vus au travers d'un prisme.** — Lorsqu'un corps est vu au travers d'un prisme, les portions de son contour qui sont parallèles aux arêtes du prisme paraissent colorées des teintes du spectre : on dit que l'image est *irisée*.

Ce phénomène est un effet d'aberration de réfrangibilité ; il s'explique par l'inégale réfrangibilité des rayons réfléchis par le corps. Si l'on regarde, par exemple, une bande *très étroite* de papier blanc collée sur un carton noir avec un prisme dont les arêtes lui soient parallèles, elle paraît colorée de toutes les couleurs du spectre, et c'est la teinte violette qui est la plus relevée vers le sommet du prisme. Dans cette expérience, la lumière blanche que diffuse la bande de papier est décomposée en traversant le prisme, et la teinte violette, qui est la plus réfrangible, étant la plus déviée, paraît plus élevée que toutes les autres.

420. **Achromatisme.** — En combinant des prismes dont les angles réfringents sont différents et qui sont faits de substances inégalement dispersives, on est parvenu à réfracter la lumière blanche sans la décomposer. Le même résultat s'obtient à l'aide des lentilles de substances différentes, dont les courbures sont convenablement combinées. Les contours des objets, vus à travers ces systèmes de prismes ou de lentilles, ne paraissent plus irisés : on dit que ces systèmes réfringents sont *achromatiques*, et l'on nomme *achromatisme* la suppression de l'aberration par réfrangibilité.

Fig. 427.

C'est Dollond, opticien de Londres, qui montra le premier, en 1757, qu'en juxtaposant deux lentilles, l'une biconvexe, en crown-glass, et l'autre concave-convexe, en flint (fig. 427), on obtenait une lentille sensiblement achromatique.

421. **Théorie de l'achromatisme (rayons centraux).** — I. *Cas des prismes.* — 1° *Lemme préliminaire. — La déviation totale produite sur un rayon simple par deux ou plusieurs prismes successifs est la somme algébrique des déviations partielles.* — Les déviations partielles *s'ajoutent* quand les prismes sont orientés dans le même sens (fig. 428, I), et elles *se retranchent* quand les prismes sont orientés en sens contraires (II). Dans le premier cas, en effet, la déviation totale D est l'angle extérieur d'un triangle KAA_1, qui a pour angles à la base les déviations partielles d et d_1. Dans le deuxième cas, l'angle D est lui-même un des angles à la base, tandis que l'angle extérieur est devenu l'une des déviations partielles, et l'on a $D = d - d_1$.

2° *Formule de la dispersion.* — Considérons maintenant un système de deux *prismes accolés* en sens contraire, d'angles réfringents A et A', et inégalement *réfringents*. Si m et m' sont les deux indices correspondants à un même rayon

du spectre, la déviation totale de ce rayon sera, d'après la formule des petits prismes,

$$D = A(m-1) - A'(m'-1).$$

Pour un autre rayon, défini par ses indices $m + \Delta m$ et $m + \Delta m'$, on aura

$$D + \Delta D = A(m + \Delta m - 1) - A'(m' + \Delta m' - 1).$$

La variation totale de déviation, ΔD, c'est-à-dire la *dispersion*, sera donc

$$\Delta D = A\Delta m - A'\Delta m'.$$

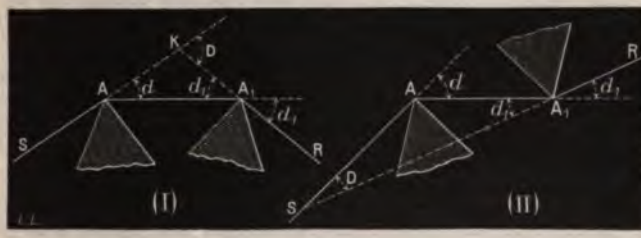


Fig. 428.

3° *Équation et condition d'achromatisme.* — Si donc on choisit les indices et es angles réfringents des prismes de manière qu'on ait

$$A\Delta m = A'\Delta m', \qquad \text{on aura} \qquad \Delta D = 0,$$

c'est-à-dire que *la dispersion sera nulle* et le prisme composé sera *achromatique pour ces deux couleurs.* L'équation

$$[1] \qquad A\Delta m - A'\Delta m' = 0 \qquad \text{ou bien} \qquad \frac{A}{A'} = \frac{\Delta m'}{\Delta m}$$

est appelée *équation d'achromatisme.* Elle exprime la condition d'achromatisme des prismes : *les angles réfringents des deux prismes accolés en sens inverses doivent être inversement proportionnels aux dispersions des deux rayons.*

Le rapport $\frac{A}{A'}$ se détermine *expérimentalement* pour deux substances inégalement réfringentes, à l'aide d'appareils spéciaux appelés *diasporamètres.*

II. *Cas des lentilles.* — Une lentille convergente accolée à une lentille divergente forme un système équivalent à celui de deux prismes d'angles opposés. En appelant y les diamètres, supposés égaux, des deux lentilles, R et R_1 les rayons de courbure de l'une, et R', R'_1 ceux de l'autre, on sait que les angles réfringents A et A' des deux prismes équivalents sont déterminés par les formules connues

$$A = y\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1}\right) \qquad \text{et} \qquad A' = y\left(\frac{1}{R'} + \frac{1}{R'_1}\right).$$

On peut, d'autre part, exprimer les courbures des deux lentilles à l'aide des formules connues

$$\frac{1}{f} = (m-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1}\right) \qquad \text{et} \qquad \frac{1}{f'} = (m'-1)\left(\frac{1}{R'} + \frac{1}{R'_1}\right).$$

En substituant ces valeurs dans l'équation [1] ci-dessus, elle devient

$$\frac{\dfrac{1}{f}}{m-1} = \frac{\Delta m'}{\Delta m}, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{\dfrac{\Delta m'}{m'-1}}{\dfrac{\Delta m}{m-1}} = \frac{\dfrac{1}{f}}{\dfrac{1}{f'}}.$$

Telle est l'*équation d'achromatisme* des lentilles.

Les quotients $\frac{\Delta m}{m-1}$ et $\frac{\Delta m'}{m'-1}$ étant appelés *pouvoirs dispersifs* des lentilles (pour les deux rayons qu'il s'agit d'achromatiser), on peut dire que deux lentilles forment un système achromatique pour deux couleurs du spectre, quand *leurs pouvoirs convergents sont inversement proportionnels à leurs pouvoirs dispersifs.*

Remarque. — On voit d'ailleurs que, contrairement à ce que pensait Newton, on peut détruire la dispersion sans annuler la réfraction, puisque l'équation d'achromatisme exprime que $\Delta D = 0$, mais non que $D = 0$.

Lentilles achromatiques. — Les lentilles achromatiques se forment de deux lentilles de substances inégalement dispersives. L'une A, de flint, est concave-convexe divergente (fig. 427) ; l'autre B, de crown-glass, est biconvexe, et l'une de ses faces coïncide exactement avec la face concave de la première. Avec les lentilles, comme avec les prismes, il faudrait sept verres pour obtenir un achromatisme parfait ; mais deux suffisent en général dans tous les instruments d'optique : on leur donne la courbure nécessaire pour achromatiser les rayons *rouge* et *jaune*.

422. Absorption de la lumière par les milieux transparents. — On ne connaît pas de substance d'une transparence parfaite. Le verre, l'eau, l'air même, éteignent graduellement la lumière qui les traverse. On observe, en effet, qu'un grand nombre d'étoiles qui ne sont pas visibles, même par le ciel le plus pur, quand on est dans les plaines, deviennent visibles sur les hautes montagnes.

Cette perte graduelle qu'éprouve la lumière en traversant les milieux diaphanes se nomme *absorption*. Si tous les rayons simples étaient également transmissibles à travers les milieux diaphanes, ceux-ci seraient incolores. Or il n'en est jamais ainsi : les corps diaphanes laissent passer certains rayons lumineux plus facilement que d'autres. Le milieu prend alors la couleur des rayons pour lesquels il est le plus diaphane. C'est pour cette raison que, sous une grande épaisseur, l'air paraît *bleu* ; de même, une lame épaisse de verre est *verte* ; le verre coloré en *rouge* par le protoxyde de cuivre ne laisse passer que les rayons *rouges*, et absorbe tous les autres, même sous une petite épaisseur.

Pour plusieurs milieux transparents, la coloration varie avec l'épaisseur. Par exemple, le perchlorure de chrome, qui est vert sous une faible épaisseur, devient rouge foncé sous une épaisseur plus grande. On nomme *polychroïques* les substances dont la teinte varie ainsi avec l'épaisseur.

RAIES DU SPECTRE ET ANALYSE SPECTRALE.

423. Raies du spectre. — 1° *Définition et production.* — Quand on produit un spectre solaire très pur (règle de Newton), on voit que ce spectre n'est pas continu ; il est sillonné, perpendiculaire-

ment à sa longueur, de *raies sombres* qu'on appelle *raies du spectre solaire*.

Pour les bien observer, on reçoit un faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure, par une fente très étroite, et à la distance de 3 à 4 mètres on regarde cette fente à travers un prisme de flint exempt de stries, en tenant les arêtes parallèles aux bords de la fente : on voit alors un grand nombre de raies sombres, très déliées, parallèles aux arêtes du prisme et très inégalement espacées. On les voit encore mieux en observant à l'aide d'une lunette.

2° *Historique et description.* — Il est étonnant que Newton n'ait pas aperçu ces raies; il est probable que la substance de ses prismes n'était pas assez pure. C'est Wollaston qui les signala le premier, en 1802; mais c'est Fraünhofer qui le premier, en 1815, les étudia avec soin et en donna une description détaillée, avec un dessin précis de 0,394 m de longueur, contenant 354 raies. Il désignait les plus apparentes par les lettres A, *a*, B, C, D, E, *b*, F, G, H; on les appelle ordinairement *raies de Fraünhofer*. La raie A (fig. 1, pl. I et II) est à la limite du rouge; B, au milieu du rouge; C, à la limite du rouge et de l'orangé; D, dans le jaune; E, dans le vert; F, dans le bleu; G, dans l'indigo et H dans le violet. Il y a encore d'autres raies remarquables, telles que *a* dans le rouge et *b* dans le vert. Avec la lumière solaire, ces raies ont des positions fixes dans les différentes régions du spectre, ce qui donne le moyen de mesurer avec précision les indices de réfraction des couleurs correspondantes.

De nombreuses recherches ont été faites depuis Fraünhofer sur le même sujet, et l'on a publié des dessins plus complets des raies du spectre solaire. On peut citer :

Le dessin de	S. Brewster,	de 1,727	m de long,	contenant	2000	raies.
—	Kirchow,	— 1,25	m —	—	3000	raies (et plus).
—	Angstrom,	— 2,90	m —	—	1000	—
—	Thollon,	— 15	m —	—	4000	—

424. Spectroscopes. — I. *Définition.* — Tout appareil qui sert à étudier le spectre est un spectroscope. Le dispositif qui a servi à Fraünhofer a été le premier modèle et le type de ces instruments. Il était formé : 1° d'une fente pratiquée dans un volet de chambre obscure, par où arrivaient les rayons solaires; 2° d'un prisme, qui décomposait la lumière solaire; 3° d'une lunette pour observer le spectre. La nécessité d'avoir des rayons incidents à peu près parallèles faisait placer le prisme à une assez grande distance, environ 10 mètres de la fente. Ce spectroscope primitif

était donc d'un usage peu commode. Le but de la construction des spectroscopes proprement dits a été d'obtenir les mêmes résultats avec un dispositif plus commode et plus précis.

II. *Description schématique.* — Tout spectroscope se compose essentiellement de quatre pièces :

1° Un *système dispersif* P, simple ou composé, formé d'un ou de plusieurs prismes qui sont convenablement disposés pour que leurs effets puissent s'ajouter (fig. 429).

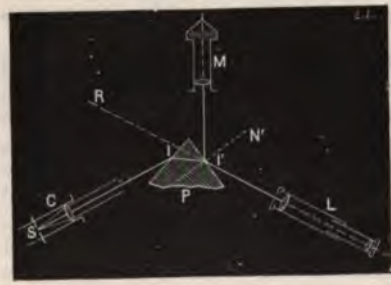


Fig. 429.

2° Un *collimateur* C, pièce destinée à envoyer sur le prisme un faisceau de rayons parallèles. Il se compose d'une lentille et d'une fente portées par un même tuyau de lunette. La fente peut être éclairée par la source de lumière quelconque qu'il s'agit d'analyser. Elle est disposée au foyer principal de la lentille, de sorte que le faisceau divergent qu'elle envoie sur celle-ci en émerge parallèlement à l'axe principal, lequel coïncide avec l'axe géométrique du tube.

3° Une *lunette* L, dont l'axe optique est dirigé de manière à recevoir les rayons émergents du prisme. Cette lunette a un faible grossissement et, par suite, un *champ* étendu. Si le *collimateur* a été bien réglé, le faisceau blanc qui en sort est parfaitement parallèle; de même les faisceaux colorés qui émergent du système réfringent sont chacun parallèles à une même direction, quelle que soit la dispersion. Chacun des faisceaux peut donc être reçu successivement dans la lunette, parallèlement à l'axe principal, et venir former une image colorée au foyer de l'objectif : c'est cette image qu'on examine à l'aide de l'*oculaire*[1].

4° Un *micromètre* M. C'est une sorte de deuxième collimateur, ayant à son foyer un *micromètre*, c'est-à-dire une échelle graduée à divisions très fines et équidistantes, photographiées sur verre. Cet objet, étant bien éclairé, envoie sur la lentille des faisceaux divergents qui en sortent parallèles à l'axe, puis viennent se ré-

1. *Nous avons vu précédemment* que si la lunette est mise au point sur un *quelconque des foyers* colorés du prisme, elle y est également sur tous les *autres (390, 2°)*, pourvu qu'on soit placé au minimum de déviation.

fléchir en I', sur la face d'émergence du prisme, et entrent dans la lunette parallèlement à son axe optique. On voit donc à la fois, dans une même direction LR, l'image du spectre et l'image de l'échelle divisée : on s'arrange de manière que celle-ci vienne se projeter un peu au-dessus de celle-là.

425. **Spectroscope ordinaire.** — Les quatre pièces de l'instrument (fig. 430) sont montées sur un pied commun, et les axes

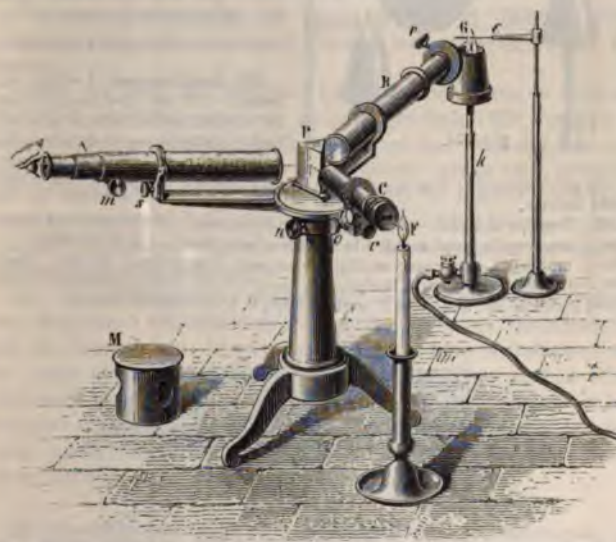


Fig. 430.

des trois tubes convergent vers les faces du prisme de flint P. La lunette A peut seule tourner autour du prisme. On la fixe par une vis de pression *n* dans la position qu'on veut lui donner. Le bouton *m* sert à *mettre au point*, c'est-à-dire à faire avancer ou reculer l'oculaire, jusqu'à ce qu'on voie nettement l'image du spectre ; enfin le bouton *s* donne le moyen d'incliner plus ou moins la lunette. La lumière qu'il s'agit d'analyser est en G. Elle est placée devant la fente du collimateur, lequel est porté par le tube B.

Le *micromètre*, *fixé* dans le tube C, est éclairé par une *bougie F*.

La fente est verticale et étroite : on l'ouvre plus ou moins en faisant marcher à l'aide d'une vis de pression v la pièce a, qui est mobile (fig. 431). On peut observer simultanément deux spectres en plaçant à la partie supérieure de la fente un petit prisme i à réflexion totale, qui renvoie dans l'axe du collimateur les rayons venus de la flamme auxiliaire.

Fig. 431.

426. Spectroscopes à vision directe. — Ce sont des appareils où la lunette, au lieu d'être plus ou moins inclinée sur la direction du collimateur, se trouve exactement *sur son prolongement* : il en résulte que le spectroscope complet a l'air d'une simple lunette.

I. *Spectroscope d'Amici.* — Il est fondé sur le principe inverse de l'achromatisme, à savoir qu'on peut annuler la *déviation* sans détruire la *dispersion*.

Amici employait un *prisme multiple*, composé d'un prisme en flint, placé entre deux prismes en crown. Hoffmann a construit un prisme multiple formé de cinq prismes (fig. 432) : F et F' sont en flint; C, C' C'' sont en crown.

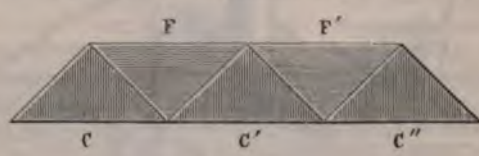


Fig. 432.

II. *Spectroscope de Thollon.* — La solution de Thollon est fondée sur un tout autre principe. Son *spectroscope à vision directe* est constitué par une combinaison de prismes qui, tout en faisant subir au rayon incident une dispersion progressive, le ramènent dans sa direction d'incidence. C'est un instrument d'une précision et d'une puissance incomparables; aussi il peut donner un spectre solaire de 185°, qui a une longueur apparente de 15 *mètres* et où l'on voit nettement plus de 4000 *raies obscures*.

Dans l'intervalle de la double raie D, on en voit *distinctement* 12 autres, dont 3 sont métalliques et 9 produites par notre atmosphère.

Enfin Thollon, par le déplacement des raies métalliques, a pu non seulement *constater* le mouvement de rotation du soleil, mais encore le *mesurer* avec une certaine précision.

427. Applications du spectroscope. — Analyse spectrale. — A l'aide de ce précieux instrument, plusieurs physiciens, après Fraünhofer, ont poursuivi l'étude du spectre pour toutes les *sources de lumière* connues, naturelles ou artificielles.

1° *Spectres continus.* — Si l'on emploie un spectroscope à fente large pour regarder la lumière du jour, ou bien un spectroscope à fente étroite pour observer des liquides ou des solides incandescents, on aura un spectre *continu*, c'est-à-dire *sans raies sombres*.

2° *Spectres des vapeurs métalliques.* — Fraünhofer, en 1815, avait déjà remarqué que les spectres des étincelles électriques étaient sillonnés de raies *brillantes*.

Plusieurs observateurs, et entre autres Fox Talbot (1826), remarquèrent que les *raies brillantes* sont caractéristiques des *métaux*.

Enfin, en 1860, MM. Kirchhoff et Bunsen fondèrent la méthode d'*analyse spectroscopique* ou *analyse spectrale*. Elle consiste à observer au spectroscope la flamme d'un bec Bunsen, très pâle par elle-même, qui s'illumine et se colore lorsqu'on y introduit un sel métallique. On constate alors dans le spectre correspondant la présence d'un nombre plus ou moins grand de raies colorées *brillantes*, toujours situées à la même place et caractéristiques du métal introduit.

Les sels métalliques les plus propres à ces expériences sont les sels facilement volatilisables, tels que les chlorures. Quand on n'a pas de chlorure sous la main, on plonge la lame métallique dans de l'acide chlorhydrique; le chlorure se forme à sa surface et on met alors la lame dans la flamme. Quelquefois, au lieu d'un bec Bunsen, on emploie les décharges électriques à travers les métaux; quelquefois aussi on fait passer la décharge entre un métal et un liquide.

428. Découvertes principales de l'analyse spectrale. — La planche coloriée montre les spectres de plusieurs métaux. La figure 1 représente le spectre solaire, qui sert de repère pour placer les raies métalliques.

La figure 2 donne le spectre du sodium. Ce spectre ne contient ni rouge, ni orangé, ni vert, ni bleu, ni violet; et il est caractérisé par *une double* raie *jaune* très brillante, qui tient exactement la place de la raie D (de Fraünhofer). Le sodium est de tous les métaux celui qui possède la plus grande sensibilité spectrale. En effet, on a constaté que $\frac{1}{3\,000\,000\,000}$ gramme de soude suffit pour faire apparaître la raie jaune du sodium. Aussi est-il difficile d'éviter cette raie. Un peu de poussière soulevée dans un appartement la fait naître, ce qui montre combien le sodium est abondamment répandu dans la nature.

La figure 3 est le spectre du potassium. Il est caractérisé par *deux* raies brillantes, l'une dans l'*extrême rouge*, et correspondant à la raie de Fraünhofer l'autre dans l'*extrême violet*.

Le spectre 4 est celui du lithium : *deux* raies principales, l'une *jaune* d'un faible éclat, l'autre *rouge* et brillante.

Le calcium (5) donne une raie *verte*, très vive, une raie orangée et une raie *bleue*.

Le strontium (6) donne huit raies, six rouges, une *orangée*, une bleue.

Le baryum (7) donne deux raies principales *vertes* et d'autres dans le jaune et le bleu.

Le cæsium et le rubidium sont des métaux relativement nouveaux, découverts par Kirchhoff et Bunsen au moyen de l'analyse spectrale. Le premier se distingue par deux raies *bleues*, le second par deux raies *rouges* très éclatantes, et par deux raies *violettes* moins intenses. Un troisième métal, le thallium, a été trouvé à l'aide de la même méthode par M. Crookes en Angleterre, et en même temps par Lamy en France. Le thallium est caractérisé par une raie *verte* unique.

L'indium, caractérisé par une raie *indigo*, a été découvert récemment. Enfin, en 1876, M. Lecoq de Boisbaudran a découvert le gallium, métal qui se distingue par deux raies *violettes*.

Remarques. — 1° L'analyse spectrale s'applique très bien à tous les métaux alcalins. Pour les métaux des autres sections, les expériences deviennent plus difficiles. Ces métaux ne se vaporisant qu'à des températures très élevées, il faut avoir recours à une source de chaleur plus intense que celle qu'on obtient avec la lampe de Bunsen. C'est de l'étincelle électrique ou de l'arc voltaïque qu'on fait alors usage. On obtient ainsi des spectres parfaitement déterminés; mais ici la méthode devient complexe par le grand nombre de raies brillantes qu'on obtient. On conçoit que cette multiplicité de raies permette difficilement de distinguer entre eux certains métaux.

2° Le spectre des métaux dépend de leur température; il n'est donc pas le même, suivant la manière dont on le produit. Ainsi, à une certaine température le sodium ne donne que la raie D; à une plus haute température, quelques raies s'ajoutent à la raie D.

3° La planche coloriée II montre les spectres des principaux métalloïdes.

429. **Résumé de spectroscopie — Spectres de divers ordres.** — I. *Spectres des*

Fig. 433.

gaz. — Ils ont été découverts par Plücker en 1856. Sa méthode consiste dans l'emploi de petits tubes capillaires renflés à leurs extrémités et pouvant être traversés par une décharge électrique. On a un trait de feu plus ou moins coloré, lequel donne un spectre (fig. 433). Ce spectre peut être de deux espèces différentes :

1° Spectre de *premier ordre* ou *cannelé*, observé dans l'azote;

2° *Spectre de deuxième ordre, à raies brillantes*, observé dans l'hydrogène.

Le premier peut devenir spectre du deuxième ordre, suivant la nature de la décharge : par exemple, dans l'azote, lorsqu'on fait passer la décharge à travers une bouteille de Leyde, on obtient un spectre de deuxième ordre.

Ces spectres dépendent encore de la pression : ainsi M. Plücker n'avait constaté qu'une raie brillante pour l'hydrogène, et M. Vülner en a constaté quatre.

II. *Spectres électriques.* — Ces spectres dépendent de la nature des électrodes, de celle des milieux et de celle de la décharge. Il y a quatre modes de décharge : l'étincelle, l'aigrette, la lueur et la décharge obscure.

L'étincelle donne des spectres du deuxième ordre; l'aigrette et la lueur, des spectres du premier ordre.

III. *Spectres d'absorption.* — Quand on fait passer la lumière à travers des verres colorés avant de la décomposer par le prisme, elle donne des spectres brillants, mais *sillonnés de bandes obscures* : ce sont des *spectres d'absorption.* Le verre le plus curieux à ce point de vue est le *verre de cobalt.*

On peut aussi produire l'absorption à l'aide des liquides colorés. Ainsi les dissolutions de sel de didyme donnent un spectre *sillonné de plusieurs raies noires.*

Un autre spectre d'absorption très curieux est celui que fournissent les gaz colorés, notamment les *vapeurs nitreuses* (ou *acide hypoazotique*) bien sèches. On voit un spectre qui se remplit de cannelures; elles commencent dans le violet et finissent par s'étendre jusqu'au rouge.

IV. *Raies telluriques.* — Brewster, en 1833, avait déjà remarqué que le spectre solaire n'est pas le même à toutes les heures du jour. Ainsi, vers le soir, et surtout par un ciel brumeux, on n'observe pas les mêmes bandes que vers midi et par un ciel clair. Il en conclut l'existence de *bandes* spéciales *d'absorption* dues à l'atmosphère terrestre. Ce sont les *raies telluriques.*

Expériences de M. Janssen. — M. Janssen reprit ces expériences (1862) avec un spectroscope puissant qui lui permit de résoudre en raies très fines les bandes observées par Brewster. Il obtint jusqu'à 3000 raies. Il fit une expérience directe en regardant le spectre solaire à travers un tube de vapeur d'eau de 37 mètres. Il a remarqué ainsi que la vapeur d'eau, vue sous une grande épaisseur, paraît *orangée*, comme le soleil couchant.

V. *Spectres intervertis.* — Fraünhofer, en 1815, avait déjà remarqué que la raie brillante de l'alcool salé coïncide exactement avec la raie noire D du spectre solaire. Foucault, en 1849, avait vu la raie noire en D au-dessus du jaune en superposant un spectre solaire au spectre électrique, mais il n'avait tiré aucune conséquence de sa remarque.

M. Kirchhoff a fait la même observation et il l'a généralisée. Il a fait passer un spectre solaire à travers la vapeur de sodium, et il a vu la raie noire D. Or la raie de la vapeur de sodium est ordinairement brillante : quand elle est noire, on dit qu'elle est *intervertie.* Il a fait de même pour la raie rouge du lithium. Toutes les fois qu'on regarde un spectre solaire continu à travers une vapeur qui donnerait seule des raies brillantes, ces mêmes raies apparaissent *sombres.* On dit alors que le spectre de la vapeur est *interverti.*

Si l'on regarde un fil de platine incandescent avec le spectroscope, on aura un spectre continu. Si entre le fil continu et le spectre on interpose la flamme de l'alcool salé, on verra une raie noire D à la place même où l'on verrait une raie jaune.

Conclusion. — Les raies sombres des *spectres d'absorption* sont dues à l'absorption de certaines radiations lumineuses par les vapeurs métalliques qui, si elles étaient plus chaudes, émettraient ces mêmes radiations, sous la forme de raies brillantes.

VI. *Constitution des astres.* — Il résulte de ces faits un nouveau genre d'études : c'est celle de la constitution des astres. Dans le spectre solaire, il y a une raie noire en D : c'est que l'atmosphère solaire contient du sodium, de

même les raies qui correspondent aux métaux connus indiquent la présence de ces métaux dans l'atmosphère solaire. Ainsi, un grand nombre de raies brillantes du fer coïncident exactement avec des raies sombres du spectre solaire : donc il y a du fer en vapeurs dans le Soleil. Les métaux dont la présence dans le Soleil paraît certaine, sont le fer, le calcium, le magnésium, le sodium, le chrome, le nickel, le manganèse et l'hydrogène, et probablement le baryum, le cadmium et le zinc.

La Lune donne le même spectre que le Soleil : cela prouve qu'elle n'émet que de la lumière réfléchie. Il en est de même des planètes, à quelques raies près, produites par leurs atmosphères.

Les étoiles donnent des raies caractéristiques, en général noires, rarement brillantes. Elles sont donc lumineuses par elles-mêmes, comme le Soleil.

Les nébuleuses donnent des spectres à raies brillantes, comme les gaz ; il en est de même des comètes.

CHAPITRE V

INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

MICROSCOPES. — INSTRUMENTS ASTRONOMIQUES. — APPAREILS DE PROJECTION.

430. **Loupe** ou **Microscope simple**. — La *loupe* ou *microscope simple* est un instrument destiné à donner des images virtuelles et amplifiées des petits objets dont les détails échapperaient à l'œil nu.

Il est formé simplement d'un *oculaire* convergent, c'est-à-dire d'une lentille convergente qu'on place devant l'œil pour regarder les petits objets. La lentille est *à court foyer*, et l'on met les objets en deçà de son foyer principal.

Marche des rayons. — Soit l'objet AB (fig. 434), que l'on veut observer : on en construira l'image en appliquant la règle générale (363) à ce cas particulier. Pour cela, on mène d'abord les axes secondaires AO et BO, puis des rayons parallèles à l'axe, qui sont réfractés de manière à passer par le foyer principal, de l'autre côté de la lentille : leurs prolongements vont couper les axes secondaires en des points A′ et B′, qui sont les foyers virtuels des points A et B. On a donc en A′B′ l'image *virtuelle, droite et amplifiée* de l'objet AB.

Mise au point. — Pour que l'image virtuelle des objets présente une grande netteté unie au maximum d'amplification, il ne suffit pas que ces objets soient fortement éclairés, il faut encore que *l'image se forme* à une distance déterminée (pour chaque œil), et

en deçà de laquelle il ne voit plus nettement, qu'on appelle *distance minimum de la vision distincte*; pour un œil bien conformé, elle est comprise dans les limites de 25 à 30 centimètres.

Chaque observateur doit *mettre au point* pour sa vue. Cela se

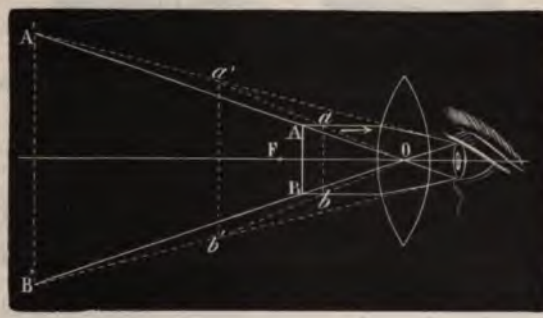


Fig. 434.

ait en modifiant *très peu* la distance de la lentille à l'objet, car un léger déplacement de l'objet en imprime un très grand à l'image.

Diamètre apparent. — On nomme *grandeur apparente*, ou *dia-*

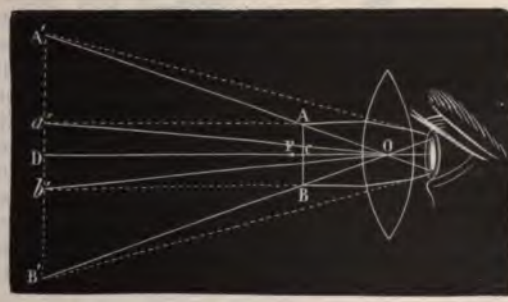


Fig. 435.

mètre apparent d'un objet AB, l'angle sous lequel on le voit, c'est-à-dire l'angle AOB (fig. 435), formé par deux rayons visuels menés du centre de la pupille aux deux extrémités d'une même dimension de l'objet.

Grossissement. — On appelle grossissement le *rapport du diamètre apparent de l'image au diamètre apparent de l'objet*, supposés l'un et l'autre à la distance minimum de la vision distincte.

Soient AB l'objet et A'B' son image (fig. 435); projetons AB sur A'B' en $a'b'$. En appelant G le grossissement, on a, par définition,

$$G = \frac{A'OB'}{a'Ob} = \frac{A'B'}{a'b'} = \frac{A'B'}{AB};$$

donc *le grossissement est égal au rapport de la grandeur de l'image à celle de l'objet.*

Des deux triangles semblables A'OB' et AOB on tire

$$G = \frac{A'B'}{AB} = \frac{OD}{OC} = \frac{p'}{p},$$

et de l'équation des lentilles convergentes (cas d'une image virtuelle), on tire

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{p'}{p} = 1 + \frac{p'}{f}.$$

En remplaçant $\frac{p'}{p}$ par G et p' par δ, on a $G = 1 + \frac{\delta}{f}$. Enfin, en négligeant 1 par rapport à $\frac{\delta}{f}$, il vient $G = \frac{\delta}{f}$, qui est la formule normale du grossissement dans la loupe. Elle montre que le grossissement est d'autant plus fort : 1° que la lentille est *à plus court foyer*, c'est-à-dire qu'elle est plus convergente; 2° que la distance minimum de la vue distincte de l'observateur est plus grande.

Remarques. — 1° Le grossissement qu'on vient de considérer est le grossissement en diamètre, ou *grossissement linéaire*. Le grossissement *superficiel* est égal au carré du grossissement linéaire.

2° Des lentilles de rechange permettent de faire varier le grossissement, mais dans de certaines limites, si l'on veut conserver à l'image toute sa netteté : le microscope simple donne des images encore très nettes avec un grossissement linéaire égal à 120.

431. Correction des aberrations. — Doublets. — Les aberrations de réfrangibilité et de sphéricité sont d'autant plus grandes dans le microscope simple qu'il est plus *grossissant*. On a vu (420) que l'aberration de réfrangibilité se corrige au moyen *de lentilles* achromatiques, et l'aberration de sphéricité à l'aide de diaphragmes *qui ne laissent passer* que les rayons voisins de l'axe (ou *rayons centraux*) pour *lesquels l'aberration* de sphéricité est négligeable.

On corrige celle-ci encore en faisant usage de deux petites lentilles plan-con-

vexes superposées, dont les faces planes sont tournées vers l'objet (fig. 457). Ces lentilles sont fixées dans un *œilleton* représenté en vraie grandeur (perspective et coupe) dans les figures 456 et 457. Quoique chacune d'elles soit moins convexe que la lentille simple qu'elles remplacent, leur système possède le même gros-

Fig. 456.

Fig. 457.

sissement, mais l'aberration en est moindre, parce que la première lentille a pour effet de rapprocher préalablement de l'axe les rayons qui tombent sur la seconde. Ce système de lentilles est connu sous le nom de *doublet de Wollaston*.

432. Microscope simple. — Ce nom est plus particulièrement réservé à la loupe, lorsqu'elle est munie d'une monture destinée à en faciliter l'emploi. Un support horizontal E (fig. 458), qui peut s'élever ou s'abaisser au moyen d'une crémaillère et d'un pignon à bouton D, porte un *œilleton* noir *m*, au centre duquel est enchâssée une lentille plus ou moins grossissante. Au-dessous est le *porte-objet*, qui est fixe et sur lequel est placé l'objet entre deux lames de verre *b*; on reçoit la lumière diffuse de l'atmosphère sur un miroir concave M, convenablement incliné pour renvoyer sur l'objet un faisceau de rayons convergents. On place l'œil très près de la lentille, puis on élève ou l'on abaisse celle-ci jusqu'à ce qu'on l'ait mise au point.

Fig. 458.

433. Microscope composé. — Le *microscope composé* est un instrument d'optique qui sert, comme la loupe, à faciliter la vision d'objets très petits, *en leur substituant une image virtuelle, renversée et amplifiée.*

Réduit à son plus grand degré de simplicité, l'instrument est

formé de deux verres convergents, l'un à court foyer, nommé *objectif*, parce qu'il est tourné vers l'objet ; l'autre, moins convergent, qui se nomme *oculaire*, parce qu'il est près de l'œil de l'observateur. Ces deux verres sont fixés dans un même tube et centrés de manière que leurs axes coïncident.

Marche des rayons. — Un objet AB étant placé très près, et un peu au delà, du foyer principal F de l'objectif M, une image aérienne *ab*, réelle, renversée et amplifiée va se former de l'autre côté de l'objectif, beaucoup au delà du second foyer principal F′ (fig. 439). Or on règle la distance du verre M à l'objet de manière que l'image *ab* se place entre l'oculaire N et son foyer F″. Il en

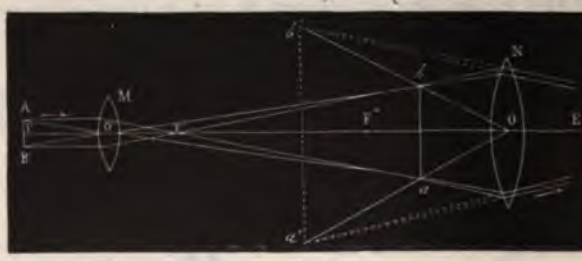


Fig. 439.

résulte que ce dernier verre produit l'effet d'une loupe, et substitue à l'image *ab* une seconde image *a′b′*, virtuelle, amplifiée de nouveau, droite par rapport à la première, et par conséquent renversée par rapport à l'objet.

Grossissement. — Le grossissement se définit de la même manière que précédemment (430). Il est facile de démontrer que le *grossissement total* est égal au *produit du grossissement de l'objectif par celui de l'oculaire.*

En effet, le grossissement de l'objectif (fig. 439) est $\frac{ab}{AB}$ et celui de l'oculaire $\frac{a'b'}{ab}$. Or le produit de ces deux rapports est $\frac{a'b'}{AB}$, qui est bien le grossissement total. Par suite, on pourrait le calculer en fonction des distances focales de l'objectif et de l'oculaire, et des distances de l'objet et de son image à ces *deux verres ; mais*, en général, on le détermine directement *par l'expérience.*

434. **Mesure expérimentale du grossissement.** — Chambre

claire de Nachet. — On se sert d'un *micromètre* et d'une *chambre claire.*

La *chambre claire* consiste en un prisme de verre *à réflexion totale.* Celle de Nachet est un double prisme de crown *abc*, tronqué en *c* (fig. 441). Fixé dans une monture de cuivre percée sur les faces inférieure et supérieure, le prisme se place sur l'oculaire du microscope (fig. 440). Une feuille de papier P étant posée auprès de l'instrument, un objet quelconque, par exemple une pointe de crayon A, appuyée sur le papier, envoie vers le prisme un faisceau de lumière qui entre normalement à la face *c*

Fig. 440. Fig. 441.

(fig. 441), subit une première réflexion totale en *bc*, une deuxième sur la face *a*, et de là arrive à l'œil comme s'il sortait du microscope. En *a* est un petit prisme rectangle qui est appliqué sur le premier prisme avec du baume de Canada, liquide transparent et dont l'indice de réfraction dépasse peu celui du crown; grâce à ce prisme additionnel, les rayons qui émergent de l'oculaire *o* traversent ainsi une lame mince à faces parallèles, et arrivent à l'œil sans déviation. L'observateur voit donc simultanément, dans le champ du microscope, le crayon et l'image des objets à observer. Il peut au besoin suivre les contours de celle-ci avec le crayon.

Opération. — On place sur le porte-objet un micromètre, divisé par exemple en *centièmes de millimètre*; puis, à l'aide de la chambre claire, on projette sur l'image des divisions du micromètre celle d'une échelle en millimètres tracée sur un papier blanc. Supposons qu'on voie 10 divisions du micromètre recouvrir *par exemple 120 millimètres* de l'échelle, on en conclut *que l'image d'une seule division* du micromètre a une grandeur

de 12 millimètres; or la grandeur absolue de l'objet est $\frac{1}{100}$ de millimètre : donc le grossissement est égal à 1200.

Réciproquement, une fois le grossissement connu, on en déduit la grandeur réelle des objets en divisant la grandeur de l'image, prise à la chambre claire, par le grossissement.

435. **Description du microscope Nachet.** — 1° *Corps de l'instrument.* — Il se compose d'un système de trois tubes de cuivre DD', I et H (fig. 442), dont le premier porte l'objectif *o*, et le dernier, H, l'oculaire O. Le troisième tube I est un tirage qui peut glisser, à frottement doux, dans le tube DD', lequel peut glisser aussi, à frottement doux, dans un tube plus gros, maintenu dans son collet E. Ce dernier est fixé à un support BB' qui, au moyen d'une vis à pas très petit, qu'on fait tourner par un bouton T, s'élève ou s'abaisse, avec une course de 6 millimètres, le long d'une tige intérieure (qui n'est pas visible dans la figure). Avec la pièce BB' monte ou descend tout le corps du microscope, ce qui permet de l'écarter ou de le rapprocher à volonté de l'objet qu'on observe. Enfin, la pièce BB' et toutes les autres pièces de l'instrument sont portées par un axe horizontal A, sur lequel elles tournent à frottement assez dur pour pouvoir s'incliner et rester fixes dans toutes les positions, depuis la verticale jusqu'à l'horizontale.

2° *Porte-objet.* — Les objets qu'on veut observer se placent, entre deux lames de verre V, sur une plate-forme R, qui est le *porte-objet*. Celui-ci est percé, en son centre, d'un trou qui laisse passer la lumière envoyée par un réflecteur M.

3° et 4° *Réflecteur et diaphragme.* — Ce *réflecteur* est un miroir concave de verre, qui est monté à articulations de manière à pouvoir prendre toutes les positions et inclinaisons et à concentrer ainsi sur l'objet la lumière diffuse de l'atmosphère ou de toute autre source lumineuse (fig. 443). Entre le réflecteur M et le porte-objet est un diaphragme K, percé sur son pourtour de quatre trous inégaux, et tournant librement autour d'un axe, de façon qu'on puisse amener à volonté chacun des trous au-dessous de l'ouverture centrale du porte-objet, et régler ainsi la quantité de lumière qui arrive à l'objet. On la règle encore en élevant ou en abaissant, au moyen d'un levier *n*, le diaphragme K, qui est mobile dans une coulisse. De plus, au-dessus du diaphragme K est une pièce *m* sur laquelle on monte, à volonté, soit un second diaphragme percé d'un très petit trou et ne laissant arriver que très peu de lumière sur l'objet, soit une lentille convergente, qui concentre la lumière sur l'objet, ou bien un prisme X à *double réflexion totale*.

Les objets qu'on observe sont en général assez transparents pour qu'on les éclaire par-dessous; dans le cas où leur opacité ne le permet pas, on les éclaire par-dessus, au moyen d'une lentille convergente, montée sur un pied à articulations; on la place de manière que la lumière diffuse de l'atmosphère soit concentrée sur l'objet.

5° *Monture du porte-objet.* — Enfin le porte-objet R et la pièce BB' ne sont pas montés directement sur l'axe A, mais sur un plateau fixé à cet axe au-dessus du porte-objet. C'est ce plateau qui est figuré *en noir* au centre du porte-objet R. Ce dernier tourne autour du plateau, guidé par une coulisse circulaire dans laquelle il est maintenu. Il résulte de ce dispositif que, en prenant à la main la pièce BB', on peut la faire tourner, ainsi que le porte-objet et le corps du microscope, autour de l'axe optique de celui-ci. Pendant ce mouvement, le réflecteur et les diaphragmes ne se déplacent pas; mais, comme les lames de *verre V tournent* avec la plate-forme R, l'objet se trouve successivement *éclairé sur toutes ses faces*.

6° *Objectif composé.* — En *o* est l'objectif (fig. 445), composé de trois petites *lentilles achromatiques* convergentes (figurées à part en L). Les effets de ces

trois lentilles s'ajoutent, et leur système agit comme une lentille unique dont le *pouvoir convergent* serait égal à la somme des pouvoirs convergents des lentilles simples. L'objet est placé en *i*, très près, mais au delà, du foyer principal de l'objectif.

7° *Oculaire composé* (*oculaire négatif* ou *d'Huygens*). — Les rayons qui

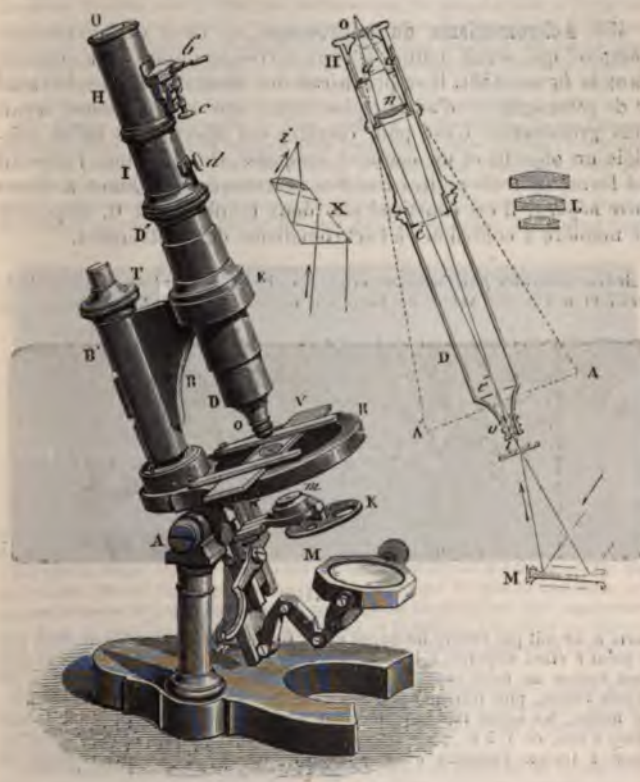


Fig. 442. Fig. 443.

émergent de l'objectif vont tomber, avant de former leur image, sur une quatrième lentille convergente *n*, qui les rend plus convergents. Ils vont former alors une image réelle et amplifiée de l'objet *i* en *aa'*, un peu au delà du foyer principal du cinquième verre convergent O. Par suite, si l'on regarde à travers celui-ci, *il agit comme loupe* et donne en AA' une image virtuelle *et très amplifiée de l'image aa'*, et, par conséquent, de l'objet. Les deux

verres *n* et O constituent un *oculaire négatif* (436), qu'on appelle aussi *oculaire d'Huygens*[1].

Remarque. — On adapte à l'instrument des objectifs et des oculaires de rechange, dont les verres plus ou moins convergents font varier le grossissement. Dans le microscope que nous venons de décrire, le grossissement superficiel peut aller jusqu'à 1500.

436. Achromatisme du microscope. — Dans un microscope composé qui serait réduit à deux verres (comme on l'a supposé dans la figure 439), il se produirait des aberrations de sphéricité et de réfrangibilité d'autant plus fortes que le microscope serait plus grossissant. C'est pour corriger ces aberrations qu'on emploie un objectif et un oculaire *composés*. On a vu que l'objectif est formé de trois petites lentilles achromatiques. Quant à l'*oculaire négatif*, il est constitué par deux lentilles *n* et O, disposées de manière à contribuer à l'achromatisme de l'instrument.

Achromatisation par l'oculaire négatif. — En effet, soient *ab* l'objet, O' l'objectif et *o* l'un des verres de l'oculaire négatif (fig. 444). Supposons que le

Fig. 444.

verre *n* ne soit pas encore interposé entre O et O'. Les rayons *blancs* émis par le point *b* étant dispersés à leur passage dans l'objectif, leurs radiations *rouges* vont former un foyer *rouge* en R, sur l'axe secondaire de *b*, tandis que les rayons violets, plus réfrangibles, vont concourir en V, plus près de la lentille; de même, les autres faisceaux forment leurs foyers entre R et V; la même chose a lieu, de V' à R', pour les rayons partis de *a*. Si l'on regarde actuellement à travers l'oculaire *o* les sept zones colorées VV'RR', les couleurs se

1. Le verre *n* est appelé soit *verre de champ* (parce qu'il augmente le *champ* (137) de l'instrument), soit *lentille collectrice* (parce qu'elle rassemble les rayons vers l'axe), ou bien encore *verre de Campani*.

On construit aussi des oculaires dits *positifs* ou *oculaires de Ramsden*. Ils sont composés de deux verres *plan-convexes* dont les convexités se regardent : *s'image* réelle, au lieu de se faire entre les deux lentilles, comme ci-dessus, *le forme en avant* du système. Les deux verres agissent alors comme un seul *pour donner de l'image* réelle une image virtuelle et amplifiée. La première *peltille agit en outre* pour corriger les aberrations.

superposant dans la partie centrale, celle-ci paraît blanche, tandis que le bords sont colorés en rouge et en orangé : de là provient l'*irisation* de l'image.

Interposons maintenant la lentille *n*. Les rayons rouges sont rapprochés de l'axe OO' par cette lentille et vont former leur foyer en *r* et *r'*, sur les axes secondaires CR et CR' ; de même les rayons violets forment les leurs en *v* et *v'*, plus près de la lentille. On conçoit qu'en combinant convenablement les courbures des lentilles *n* et O, ainsi que leur distance, on puisse arriver à placer les foyers *v* et *r* en ligne droite avec le centre optique de l'oculaire O. Les autres faisceaux colorés forment d'ailleurs leurs foyers très sensiblement sur la ligne *vr* : donc, lorsqu'on regarde à travers l'oculaire les sept faisceaux, ceux-ci étant vus sous le même angle, il y a recomposition de la lumière par suite de la superposition des impressions sur la rétine, et l'irisation disparaît.

457. **Champ. — Diaphragme. — Point oculaire.** — On appelle *champ* l'espace angulaire dans lequel sont compris tous les points visibles à travers l'oculaire, dans une position donnée de l'instrument d'optique. Le champ est *limité par une surface conique ayant pour sommet le centre optique de l'objectif, et pour base l'ouverture d'un* diaphragme *pq placé en avant de l'oculaire dans le plan de l'image fournie par l'objectif* (fig. 445). La seconde nappe de ce cône vient

Fig. 445.

couper l'objet en *ab*, et en limite la partie visible : on dit que la portion *ab* est dans le *champ* de l'instrument.

Lorsqu'un objet dépasse les limites du champ, il n'y en a qu'une partie qui soit visible. Mais si l'on interpose un verre convergent tel que la lentille *n*, des rayons tels que B*ei*, qui étaient interceptés par le diaphragme, sont rapprochés vers l'axe de manière à tomber sur l'oculaire, et le point B, qui n'était pas visible, le devient. On voit donc que le verre *n* (*verre de champ*) augmente le champ ; mais en réduisant l'image *a' b'* il diminue le grossissement.

Le *diaphragme pq* est formé d'un mince disque de laiton noirci, percé d'une ouverture centrale. Il est destiné à ne laisser passer que les rayons qui arrivent à l'oculaire sous une faible obliquité et à réduire ainsi les effets d'aberration de sphéricité.

Point oculaire. — A leur sortie de l'oculaire, il y a un point où les rayons vont converger : on l'appelle *point oculaire*. C'est le foyer conjugué, *par rapport au dernier verre de l'oculaire*, du centre optique de l'objectif (considéré comme point lumineux). Et, en effet, c'est de ce dernier point que partent les axes secondaires de tous les faisceaux lumineux qui tombent sur l'oculaire. C'est donc en l'image de ce point que tous ces axes viennent converger, et c'est là qu'on doit placer l'œil pour embrasser tout le champ. Plus près ou plus loin, il ne recevrait qu'une partie des rayons émergents.

Œilleton. — Pour fixer la position de l'œil, on place en avant de l'oculaire un *œilleton noir rs, percé d'une* ouverture centrale, de manière que l'œil placé *devant cette ouverture se trouve juste* au point oculaire.

INSTRUMENTS D'OPTIQUE ASTRONOMIQUES.

458. **Lunettes** ou **Réfracteurs**. — **Télescopes** ou **Réflecteurs**. — Les instruments d'optique qu'on emploie dans les recherches et les mesures d'astronomie se divisent en deux classes :

1° Les *lunettes* ou *réfracteurs*, dans lesquels l'image est obtenue par la réfraction de la lumière à travers une lentille appelée *objectif*;

2° Les *télescopes* ou *réflecteurs*, dans lesquels l'image est obtenue par la réflexion de la lumière sur un miroir sphérique ou parabolique.

Au foyer du réfracteur comme à celui du réflecteur, on place d'ordinaire un cadre métallique, muni de fils fins, fixes ou mobiles, à l'aide desquels on effectue les mesures : c'est le *micromètre* (fig. 446).

Fig. 446.

Il y a deux types principaux d'instruments astronomiques en usage dans les observatoires :

1° Les *instruments méridiens*, qui servent aux observations de haute précision : ils sont mobiles uniquement autour d'un axe horizontal, perpendiculaire au méridien; ils décrivent, par conséquent, le méridien dans leur déplacement;

2° Les *instruments équatoriaux*, qui servent aux recherches, ainsi qu'aux mesures différentielles, car ils sont montés de manière à permettre de viser un point quelconque du ciel. Les *télescopes* rentrent dans cette catégorie, étant généralement montés *équatorialement*[1].

459. **Réfracteur** ou **Lunette** dite **astronomique**. — 1° *Marche des rayons*. — L'objectif O (fig. 447, *a*) donne de l'astre[2] qu'on observe une image *a'*F, réelle et renversée, laquelle, vu la grande distance de l'objet, se forme au foyer principal F de l'objectif. C'est cette image que l'on regarde avec un oculaire composé, qui sert de loupe. En le supposant réduit au verre O', on obtient par la construction connue une image virtuelle A'B' de l'image réelle *a'*F.

On voit (fig. 447, *b*) la marche d'une portion du faisceau lumineux venu de l'astre à travers la lunette. Les traits pleins figu-

1. Les paragraphes relatifs aux instruments astronomiques ont été rédigés avec la collaboration de M. E. Périgaud, astronome à l'Observatoire de Paris.

2. *Dans cette construction*, on ne représente que les axes secondaires extrêmes *de l'objet qu'on regarde*; car, en réalité, cet objet est toujours très éloigné de *l'objectif. La même* remarque s'appliquera ci-après à tous les instruments *astronomiques*.

rent les rayons réels et les traits ponctués leurs prolongements géométriques.

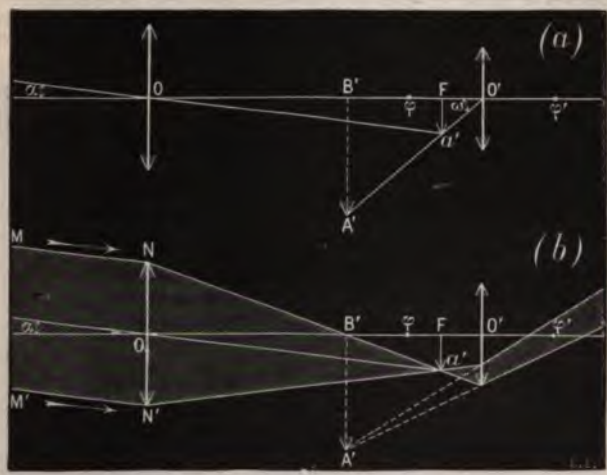


Fig. 447.

2° *Grossissement.* — On appelle grossissement *le rapport du diamètre apparent de l'image, vue dans la lunette, au diamètre apparent de l'objet vu à l'œil nu.*

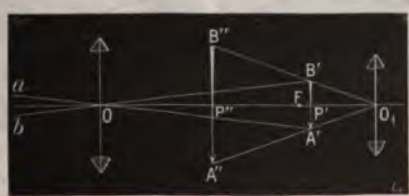


Fig. 448.

Soit aOb (fig. 448) le diamètre apparent de l'objet, A'B' l'image réelle, et A''B'' l'image virtuelle. On a, par définition,

$$G = \frac{A''O_1B''}{aOb}.$$

Pour calculer ce rapport, on peut substituer aux arcs leurs tangentes trigonométriques.

On a d'abord $A''O_1B'' = 2A'O_1P'$ et $aOb = 2A'OP'$,

et, par conséquent, $$G = \frac{A'O_1P'}{A'OP'}.$$

On a d'ailleurs $\text{tang}\, A'O_1P' = \frac{A'P'}{P'O_1}$ et $\text{tang}\, A'OP' = \frac{A'P'}{P'O}$.

En substituant, il vient $$G = \frac{P'O}{P'O_1}.$$

$P'O$ diffère peu de F, distance focale principale de l'objectif O,
$P'O_1$ — de f, — — de l'oculaire O_1.

En substituant ces distances, il vient $$G = \frac{F}{f}.$$

C'est une *limite inférieure* du grossissement. En effet,

d'une part on a. . . . . $P'O$ toujours $> F$,
et d'autre part. . . . . $P'O_1$ — $< f$.

3° *Chercheur.* — Les lunettes d'un fort grossissement ont très peu de champ (457) et ne sont pas d'un usage commode pour chercher un astre : c'est pourquoi l'on dispose sur le tube principal de la lunette une autre petite lunette, qu'on nomme *chercheur*, dont l'axe optique est disposé parallèlement à celui

Fig. 449.

de la grande lunette (fig. 449 et 450). On explore le ciel avec le chercheur, qui grossit moins, mais qui a plus de champ ; on observe ensuite avec la lunette, dont l'axe se trouve nécessairement placé dans la direction de l'objet.

4° *Axe optique et ligne de visée.* — La droite qui joint *le centre optique de l'objectif à un point choisi du réticule* du micromètre est *l'axe optique* de la *lunette*. Par suite, on peut avoir autant d'axes optiques qu'on peut choisir

de points dans le micromètre. En déplaçant le point de croisement, on déplace l'axe optique; mais en général on fait coïncider celui-ci avec l'axe géométrique, c'est-à-dire avec l'axe du tube de la lunette. L'axe optique ainsi déterminé devient la *ligne de visée*. Pour déterminer un point, on dirige la lunette de manière que l'image se forme exactement au point de croisement des fils. *Au jour*, les fils du réticule se détachent nettement dans le champ de la lunette;

Fig. 450. — Grand équatorial droit (Tour de l'Ouest. Observatoire de Paris).
Diamètre de l'objectif : 0,51 m. — Distance focale : 5,25 m.

dans l'obscurité, il faut les éclairer par la lumière d'un bec de gaz placé latéralement, et dont les rayons sont renvoyés une première fois d'abord, à l'aide d'une lentille, dans le tourillon *creux* qui sert d'axe de rotation, puis une deuxième fois au moyen d'un petit prisme à réflexion totale sur le micromètre.

Longueur de la lunette. — Elle est égale à OF + O'F, c'est-à-dire à peu près à la somme des distances focales; elle augmente avec le grossissement. Dans une bonne lunette, le grossissement ne dépasse pas 1000, et la longueur atteint alors 8 mètres.

440. Mesure expérimentale du grossissement. — Méthode de Ramsden. — 1° *Principe : Point oculaire* et *Cercle oculaire de Ramsden.* — L'*objectif* O, qui est exposé à la lumière directe de l'astre, joue par rapport à l'*oculaire* O_1 le rôle d'un objet lumineux, et l'*oculaire* O_1 joue par rapport à cet objet lumineux le rôle d'un *objectif* (fig. 451).

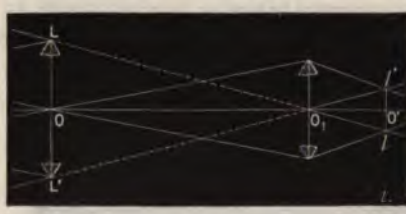


Fig. 451.

Par suite, on aura, au delà de l'oculaire, une image *ll'* réelle et réduite, de l'objectif LL'. Elle se fera à une distance O_1O' telle, que l'on ait

$$\frac{1}{O_1O'} + \frac{1}{O_1O} = \frac{1}{f}$$

et la grandeur de l'image *ll'* sera donnée par l'équation $\frac{ll'}{LL'} = \frac{O_1O'}{O_1O}$.

Le point O' conjugué du point O par rapport à O_1 s'appelle le *point oculaire de Ramsden*; l'image *ll'* s'appelle *cercle oculaire de Ramsden.*

En remarquant que O_1O est sensiblement égal à $F + f$, on trouve aisément que

$$\frac{O_1O'}{O_1O'} = \frac{F}{f}, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{LL'}{ll'} = \frac{F}{f} = G.$$

Donc le rapport $\frac{LL'}{ll'}$ est précisément égal au grossissement vrai linéaire. Il suffit donc de mesurer LL' et *ll'*.

2° *Opération : Dynamètre de Ramsden.* — La mesure de *ll'* se fait avec précision au moyen du *dynamètre* de Ramsden.

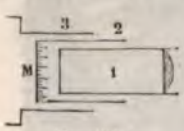


Fig. 452.

C'est une petite loupe engagée dans un système de trois tubes, à deux tirages (fig. 452). 1 est le tube qui porte la loupe. 2 est un tube portant un micromètre M en corne translucide, divisé en centièmes de millimètre. 3 est un troisième tube, ou plutôt un anneau où s'engage le système des deux premiers tubes, et qu'on peut adapter à l'oculaire de la lunette.

On visse la garniture 3 sur l'oculaire de la lunette. On enfonce 1 dans 2 jusqu'à ce qu'on voie nettement l'image du micromètre, puis le tout dans 3 jusqu'à ce que l'image du cercle oculaire vienne se peindre sur celle du micromètre. On peut évaluer alors, avec toute la précision d'une mesure à la loupe, la grandeur de *ll'*.

Pour mesurer LL', c'est-à-dire le diamètre de la portion efficace de l'objectif, on se sert d'un compas dont les pointes, placées sur l'objectif, viennent former leur image sur la circonférence du *cercle oculaire.*

441. Clarté dans les lunettes. — On appelle *clarté* le rapport de la quantité de lumière qu'on reçoit sur la rétine en regardant un objet avec une lunette, à celle qu'on reçoit en regardant le même objet à l'*œil nu.* Il y a deux cas bien distincts à considérer : 1° celui où la lunette *a un grossissement*, 2° celui *où la lunette n'a pas de grossissement.* Le premier est le cas des objets lumineux *qui ont un diamètre* apparent sensible, comme les planètes ou les objets terrestres, et le deuxième celui des objets qui n'ont pas de diamètre apparent *sensible, comme* les étoiles de toutes grandeurs.

1° *Cas des planètes.* — La quantité de lumière envoyée par l'unité de surface de la planète dans la lunette qui est pointée sur elle, est évidemment proportionnelle à l'*ouverture* de la lunette, c'est-à-dire à la section de l'objectif. En désignant par 1 l'intensité du faisceau envoyé par l'unité de surface de l'objet,

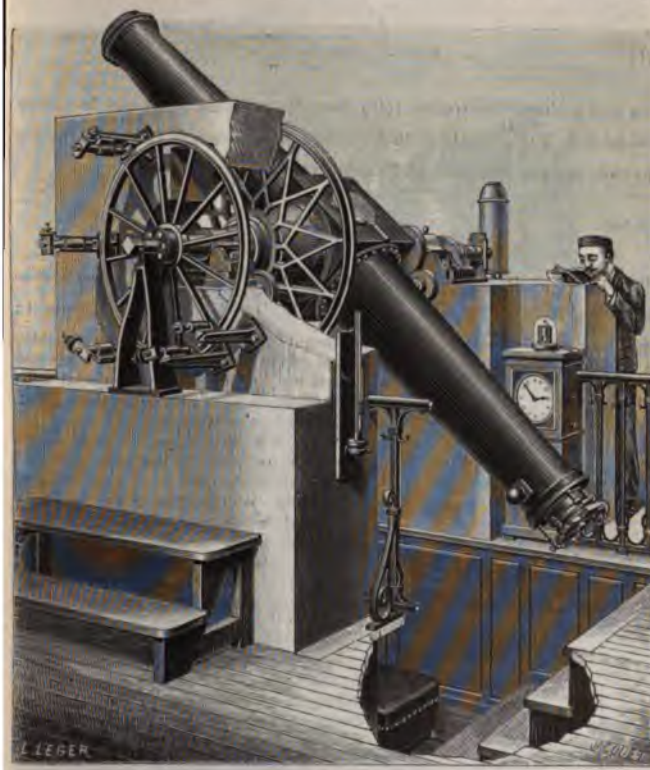


Fig. 455. — Grand cercle méridien. (Observatoire de Paris.)

nous pourrons représenter par $\frac{y^2}{1}$ ou y^2 l'intensité du faisceau qui pénètre dans la lunette (y est le diamètre de l'objectif). Si la lunette n'avait pas de grossissement, ce même coefficient y^2 représenterait l'intensité (par unité de surface) du faisceau qui pénètre dans l'œil. Mais la lunette a généralement un grossissement linéaire G : donc la quantité de lumière y^2 s'éparpille, non plus sur une surface 1, *mais sur une surface égale à* G^2 ; par conséquent $\frac{1}{G^2}$ est l'in*tensité du faisceau transmis par la lunette.*

D'autre part, l'intensité du faisceau qui serait envoyé directement à l'œil nu par l'unité de surface de l'astre est *proportionnelle* à l'ouverture de la pupille : on peut donc la représenter par ω^2 (en appelant ω le diamètre de la pupille). On aura donc la clarté C en prenant le rapport de ces deux intensités :

$$[1] \qquad C = \frac{\frac{y^2}{G^2}}{\omega^2} = \frac{y^2}{\omega^2} \cdot \frac{1}{G^2}.$$

On peut aisément interpréter cette formule en remarquant que la valeur de G est égale à $\frac{y^2}{y'^2}$ (méthode du dynamètre de Ramsden, y' étant le diamètre du cercle oculaire de Ramsden). En substituant cette valeur, on a

$$[1\ bis] \qquad C = \frac{y'^2}{\omega^2} = \left(\frac{y'}{\omega}\right)^2.$$

Or, en général, dans les lunettes bien construites, le diamètre du cercle oculaire est *inférieur* à celui de la pupille. Donc le rapport $\frac{y'}{\omega}$ est plus petit que 1 : donc, en général, pour tous les objets ayant un diamètre apparent sensible, l'éclat des images fournies par les lunettes est inférieur à l'éclat des objets vus à l'œil nu ; et le maximum d'éclat que l'on puisse obtenir dans une lunette, c'est l'éclat de la *vision directe*.

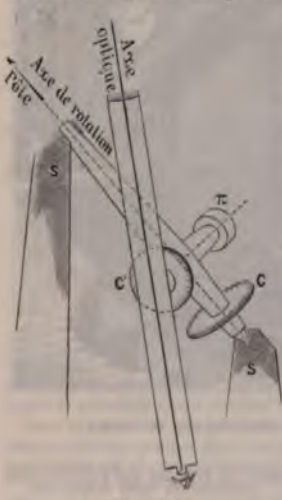


Fig. 454.

2° *Cas des étoiles.* — L'image d'une étoile n'a pas plus de diamètre sensible que l'étoile elle-même, vue à l'œil nu. Par conséquent, pour comparer les éclats de l'image et de son objet, il n'y a qu'à comparer les intensités des deux faisceaux incidents (et sur la lunette et sur l'œil). Or le premier a une intensité qui peut être représentée par y^2 (y étant le diamètre de l'objectif). Cette intensité est conservée dans le faisceau émergent de la lunette, qui pénètre dans l'œil, puisque ce faisceau, étant concentré dans le diamètre du cercle oculaire y', pénètre tout entier par la pupille de l'œil, dont le diamètre ω est $> y'$. D'autre part, le faisceau qui tomberait directement sur l'œil nu aurait pour intensité ω^2 (ω étant le diamètre de la pupille). Donc on a $C = \frac{y^2}{\omega^2}$.

C est beaucoup plus grand que 1 ; par conséquent l'*éclat*, dans ce cas, est considérablement augmenté par la vision à travers la lunette. C'est pour cela qu'on voit, à l'aide des instruments astronomiques, des étoiles qui seraient complètement invisibles à l'œil nu.

412. Instruments méridiens et Équatoriaux. — La lunette astronomique est l'organe essentiel des *Instruments méridiens*, ainsi que des *Équatoriaux*.

Un Cercle méridien est constitué par une lunette et par un *cercle* qui est

perpendiculaire à l'axe passant par le centre (fig. 453). Avec cet instrument, à l'instant où un astre passe au méridien, on évalue successivement :

Fig. 453. — Grand télescope. (Observatoire de Paris.)
Miroir en verre argenté de 1,20 m. — Distance focale : 7,20 m.

1° *L'heure du passage au méridien*, en notant les instants des passages successifs aux différents fils verticaux du micromètre ;

2° La hauteur de l'astre au-dessus de l'horizon, au moyen du cercle et de microscopes installés à poste fixe en face de son plan.

Dans un *Équatorial* (fig. 450), la lunette possède deux mouvements : l'un, dans un plan parallèle à l'axe du monde, de telle sorte que l'axe optique de la lu-

Fig. 456. — Grand équatorial coudé. (Observatoire de Paris.)

nette puisse faire avec l'axe du monde un angle quelconque, mesuré sur le cercle C' (fig. 454); l'autre est un mouvement conique autour de l'axe du monde. Ce dernier est mesuré sur un cercle C perpendiculaire à l'axe et dont *les divisions passent* devant un index fixe. Ce cercle est donc parallèle à l'équateur : *de là le nom d'équatorial* donné à l'instrument. Le mouvement conique *est obtenu à l'aide d'un régulateur* Foucault, qui lui donne une durée égale

à celle du mouvement diurne. Cela permet à l'observateur de suivre un astre continuellement, une fois qu'il a été amené dans le champ.

Chaque équatorial est abrité par un *dôme* ou une *coupole* qui peut rouler sur des galets autour d'un axe vertical passant par le centre de l'instrument. La coupole est munie d'une ouverture en fuseau (fig. 450) que l'on peut dégager au moyen de trappes-fenêtres, et amener, par la rotation de l'ensemble, en face de la région du ciel qu'on veut observer.

443. Équatorial coudé. — Un instrument de ce genre (fig. 456) a été récemment imaginé et installé à l'Observatoire de Paris par M. Lœwy. C'est l'*équatorial coudé*, qui permet à l'observateur de voir un point quelconque du ciel sans changer de place, en restant assis commodément dans un cabinet parfaitement clos, à l'abri des intempéries de l'air. A ces avantages, si précieux pour l'observateur, s'ajoute celui de rendre inutiles ces immenses coupoles d'un prix si élevé, en permettant de leur substituer au besoin une simple cabane en bois qu'on peut déplacer sur des rails au moment de l'observation : de telle sorte que, tandis que l'observateur est à l'abri, la partie optique de l'instrument (objectif et miroir) se trouve complètement en plein air.

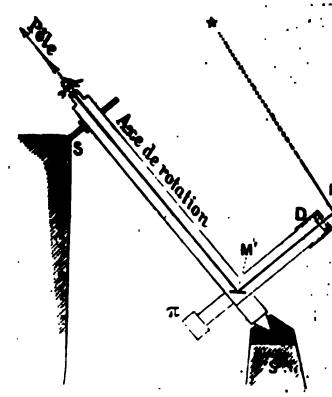


Fig. 457.

C'est grâce à une ingénieuse combinaison de surfaces optiques, réfringentes et réfléchissantes, que M. Lœwy a obtenu ce résultat.

Le tube portant l'objectif est fixé perpendiculairement à l'axe du monde et peut tourner autour de lui. Sur ce tube est disposé un manchon qui porte un miroir M (fig. 457), incliné à 45° et qui est mobile autour de l'axe du tube. Si ce miroir est tourné vers une étoile dont la direction soit perpendiculaire à l'axe du tube, les rayons de cette étoile seront envoyés dans la lunette parallèlement à cet axe ; mais, arrivés au centre de l'instrument, ils rencontrent un deuxième miroir M' incliné à 45°, qui les renvoie dans la direction de l'axe du monde, sur le micromètre placé devant l'œil de l'observateur. Grâce à ce double mouvement du tube objectif autour de l'axe du monde et du miroir autour de l'axe du tube, on peut amener sur le micromètre tel astre que l'on veut.

444. Lunette terrestre. — La *lunette terrestre*, ou *longue-vue*, diffère de la lunette astronomique en ce qu'elle donne des images droites. Leur redressement s'obtient à l'aide d'un système de deux verres convergents O_1 et O_2 (fig. 458), qu'on appelle le *véhicule*. Ils sont placés dans le même tube que l'oculaire et séparés l'un de l'autre par leur distance focale principale φ, qui leur est commune. Le verre antérieur O_1 doit avoir son foyer principal dans le *plan même où vient* se former l'image aérienne fournie par *l'objectif O*.

Marche des rayons. — Soient OA′ et OB′ les axes secondaires des deux extrémités de l'objet (qu'on suppose placé très loin, en dehors des limites de la figure) : l'objectif fournit une image réelle et renversée A′B′, que l'on construit d'après les règles ordinaires. Les deux faisceaux qui divergent des extrémités A′ et

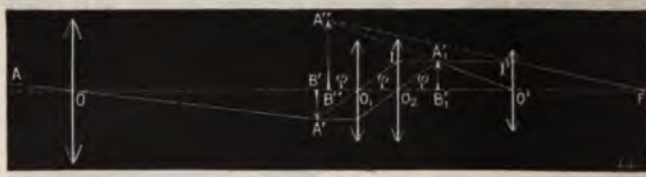


Fig. 458.

B′ (ainsi que des autres points de l'image aérienne qui sont situés dans le plan focal de O_1), sont réfractés de manière à sortir chacun parallèlement à son axe secondaire par rapport au verre O_1; et chacun de ces faisceaux parallèles rencontre la lentille O_2, qui le fait converger dans son plan focal. Il se forme donc, en $A'_1B'_1$, une image renversée de A′B′, et, par conséquent, *droite* par rapport à l'objet. Et si l'on regarde l'image A'_1, B'_1 avec une loupe O′, on voit une image A″B″ virtuelle et amplifiée de AB.

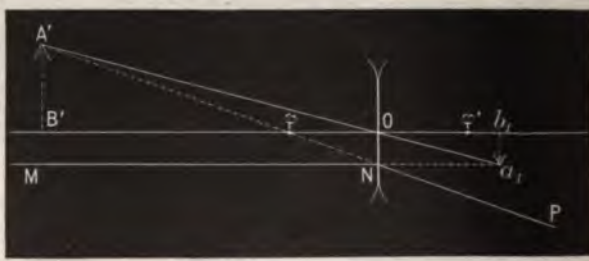


Fig. 459.

La figure montre la marche complète du faisceau émané de l'extrémité A′ de l'image réelle; la construction même démontre que $A'_1B'_1$ est égale à A′B′.

Grossissement. — On le définit de la même manière que dans la lunette astronomique et l'on arrive à la même formule.

Oculaire quadruple ou Oculaire terrestre. — Dans la figure 458, on a supposé l'oculaire O′ simple; mais, en réalité, c'est un

oculaire négatif à deux verres, montés dans un même tube, et à des distances constantes, avec les lentilles O_1 et O_2 : en sorte que le tout forme un *oculaire à quatre verres*, spécial à la lunette terrestre et appelé quelquefois *oculaire terrestre*. Cet oculaire est à double tirage, comme celui de la lunette astronomique : c'est en le déplaçant lentement qu'on opère la mise au point.

445. **Lunette de Galilée.** — La *lunette de Galilée*, ou *lorgnette de spectacle*, est la plus simple des lunettes ; car elle ne se compose que de deux systèmes de verres (fig. 460). Le premier est un système convergent O_1, constitué par une lentille biconcave en *flint-glass*, renfermée entre deux lentilles convexes en verre ordinaire ou *crown-glass*. L'oculaire est une lentille convexe en *flint*, O, embrassée par deux lentilles concaves en *crown*. Le corps de la lunette se compose d'un tube, gros et court, T_1, portant l'objectif, dans lequel peut glisser un tirage T portant l'oculaire.

Fig. 460.

Marche des rayons. — Soit $a_1 b_1$ l'image renversée, réelle et plus petite que l'objet, fournie par l'objectif (fig. 459). L'oculaire O est interposé sur le trajet des rayons convergents, de manière que son foyer φ' soit placé *en deçà de l'image* : celle-ci devient en quelque sorte *virtuelle* et les rayons qui iraient la former *réellement* s'ils n'étaient pas interceptés, se réfractent en traversant l'oculaire de manière à diverger. Dans ce faisceau divergent, considérons le rayon qui passe par le centre optique de l'oculaire : celui-là traverse sans déviation, c'est un axe secondaire. Considérons en outre le rayon MN, parallèle à l'axe, qui *irait contribuer* à la formation de l'image a_1 s'il ne rencontrait pas la lentille : celui-là est réfracté en NP, de manière que son prolongement géométrique passe par le foyer φ de la lentille. Le point de rencontre A' de ces deux rayons est le sommet de l'image virtuelle fournie par l'oculaire. En abaissant A'B', perpendiculaire à l'axe principal, on a l'image.

Grossissement. — De même que dans tous les instruments astronomiques, réfracteurs ou réflecteurs, il a pour valeur-limite le rapport $\frac{F}{f}$ (F, *f*, distances focales de l'objectif et de l'oculaire).

Avantages et inconvénients. — Il résulte de là que l'écartement

des deux verres est à peu près égal à la différence de leurs distances focales, et, par suite, que la lunette de Galilée est très courte et très portative. Elle permet de voir les objets dans leur véritable position, et de plus, n'ayant que deux verres, elle absorbe peu de lumière; aussi s'en sert-on couramment aujourd'hui comme de *viseur* dans les lectures de précision, au lieu de la lunette ordinaire.

Jumelles ou *Lorgnette binoculaire.* — On emploie encore la lunette de Galilée comme *lorgnette de spectacle*, soit simple, soit *double*. Dans ce dernier cas, la vision est *binoculaire*, c'est-à-dire qu'il se forme une image dans chaque œil.

Un système de bouton à crémaillère permet de manœuvrer simultanément les tirages des deux lunettes.

446. Applications scientifiques des lunettes terrestres. — Réglage du cathétomètre. — Les lunettes terrestres (ou simplement *lunettes*) entrent, comme organe essentiel, dans un grand nombre d'appareils ou instruments de physique. Nous allons en expliquer l'emploi, en décrivant l'opération du réglage du cathétomètre.

Réglage du cathétomètre. — Ce réglage comprend deux sortes d'opérations successives :

1° La *vérification* de la *lunette* et de son *niveau*; 2° le *réglage du support de la lunette* et celui de l'*axe de rotation*.

I. *Vérification de la lunette et de son niveau.* — Cette opération préliminaire s'effectue une fois pour toutes. C'est l'axe optique (439, 4°) qui définit la direction suivant laquelle *on vise* à l'aide d'une lunette. Quant à l'axe *géométrique* de la lunette, il est défini par les deux centres des deux colliers égaux sur lesquels repose l'instrument (fig. 72).

1° *Vérification de la lunette.* — Elle consiste à vérifier si l'*axe optique* coïn-

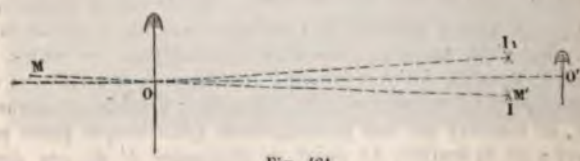


Fig. 461.

cide avec l'*axe géométrique* de la lunette. — On vise un point extérieur M, dont on amène l'image M' (fig. 461) sur la croisée des fils. Supposons que ce point I ne soit pas sur l'axe géométrique. Dans ce cas, si l'on fait tourner l'instrument sur lui-même, l'axe optique OI se déplacera en traçant une surface *conique*. Quant à l'image M', elle restera en place sur le prolongement de la *ligne OM, qui est* son axe secondaire, mais elle ne coïncidera plus avec la *croisée des fils, qui* a été amenée en I_1. On voit que le déplacement angulaire IOI_1 *est la moitié* de l'angle que fait actuellement l'axe de figure de la

lunette avec son axe optique. En déplaçant le réticule I (au moyen d'une vis disposée à cet effet) de la moitié de II_1, on réalisera la coïncidence cherchée. On s'aperçoit qu'il en est ainsi lorsque, en faisant tourner la lunette sur son axe, l'image M' ne quitte plus le point I.

Remarque. — Il n'est pas indispensable que la bulle soit, au début, entre les repères; elle peut occuper une position quelconque sur le niveau, à la condition qu'elle revienne à la même position dans l'espace par rapport à l'observateur, après le retournement de la lunette; mais il est préférable d'opérer comme il a été dit.

2° *Vérification du niveau.* — Elle consiste à vérifier si *la ligne des repères du niveau mn* (fig. 70) *est parallèle à l'axe géométrique* de la lunette.

On commence par agir sur la vis *p* qui fait mouvoir la fourchette *i* autour de l'axe *c*, jusqu'à ce que la bulle du niveau vienne se placer entre ses repères. A ce moment, la ligne des repères est horizontale. Si donc l'axe géométrique de la lunette était parallèle à la ligne des repères, il serait actuellement *horizontal*. Or il est facile de s'en assurer, *en retournant* la lunette *bout pour bout* dans ses colliers.

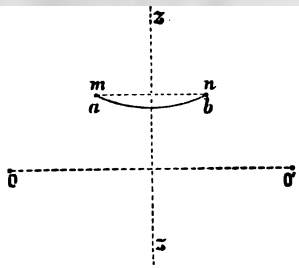


Fig. 462.

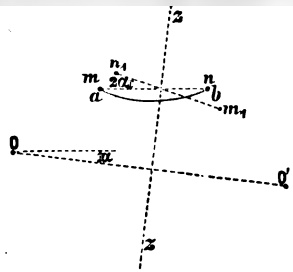


Fig. 463.

En effet, le système tout entier tourne autour d'un axe *zz* perpendiculaire à l'axe géométrique OO' (fig. 462), et, par suite, l'extrémité O vient en O' et *vice versâ*. Or, si OO' était horizontal, l'axe de rotation *zz* est une ligne verticale, qui est également perpendiculaire à la ligne des repères *mn*, ainsi qu'à la ligne des extrémités de la bulle *ab*; alors *n* vient en *m* et *vice versâ*, et paraît coïncider toujours avec *ab*, qui reste en place.

Mais supposons que la condition de parallélisme, entre OO' et *mn*, ne soit pas remplie (fig. 463). Si l'on opère le retournement du système bout pour bout, les extrémités *a* et *b* de la bulle, qui demeure horizontale, ne restent pas sur les extrémités de la ligne de repères, qui vient en m_1n_1. La nouvelle position de celle-ci, qui est symétrique de *mn* par rapport à l'axe *zz*, fait avec l'ancienne un angle 2α, précisément indiqué par le déplacement apparent de la bulle.

On agira alors sur la ligne des repères de manière à faire varier de α son inclinaison, opération qui se fait à l'aide d'une vis dont le niveau est muni. Puis on recommencera l'essai précédent, par le retournement bout pour bout, jusqu'à ce qu'on réduise à zéro le déplacement de la bulle par rapport à *mn*. A ce moment, on pourra considérer la ligne des repères du niveau comme *exactement parallèle à l'axe géométrique* (et par suite à l'axe optique) *de la lunette.*

II. *Réglage du support et de l'axe de rotation.* — Il reste à régler le cathétomètre, de manière que l'axe optique de la lunette se déplace toujours dans un plan horizontal, quelle que soit sa position sur l'axe de l'instrument. Cette opération se compose de deux parties.

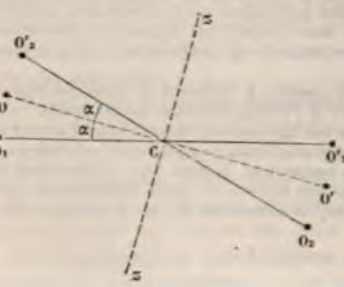


Fig. 464.

1° *Rendre l'axe optique de la lunette perpendiculaire à l'axe de rotation du support.*

Supposons cette condition remplie : on s'en assurera aisément de la manière suivante : Quelle que soit l'orientation zz de l'axe de rotation de l'instrument (fig. 464), l'axe optique de la lunette a une direction telle que OO', perpendiculaire à zz. Si donc on fait tourner le système de 180° autour de zz, la bulle du niveau gardera, dans l'espace, la même position par rapport à l'observateur, et si l'on retourne la lunette bout pour bout, la bulle se retrouvera sur le même trait que primitivement.

Supposons, au contraire, que l'axe optique de la lunette soit $O_1O'_1$, faisant un angle α avec l'orientation normale OO'. Si l'on fait la double opération précédente, l'axe optique de la lunette viendra se placer en $O_2O'_2$, symétriquement avec OO'_1, par rapport à zz_1 (O_1 en O_2 et O'_1 en O'_2), et l'angle $O_2CO'_2$ sera précisément égal à 2α. Et si l'on retourne la lunette bout pour bout, on ne fera que replacer la ligne des repères du même côté par rapport à l'axe, de façon que le déplacement de la bulle par rapport à la ligne des repères donnera directement la mesure de l'angle 2α.

On corrigera le défaut de parallélisme en agissant sur la vis *p* (fig. 72) de manière à diminuer de α environ, le déplacement de la bulle. Puis on constatera si cette correction est suffisante, en vérifiant si la perpendicularité est réalisée. Sinon on recommencera la même opération, et ainsi de suite.

Remarque. — De même que dans l'opération I, il est utile de placer la bulle entre ses repères : alors elle doit y rester, quand on a fait tourner de 180°.

2° *Rendre l'axe du support vertical.* — Il ne reste plus qu'à rendre vertical l'axe de l'instrument. Cette opération est à peu près la même que celle qui consiste à rendre un plan horizontal à l'aide du niveau à bulle d'air (158). En effet, il suffit d'agir sur les vis calantes du pied de l'appareil jusqu'à ce que la bulle du niveau vienne se mettre entre ses repères pour deux positions, à peu près rectangulaires, de la lunette. Car alors l'axe du cathétomètre, étant perpendiculaire à deux horizontales, est une *ligne verticale*.

447 **Télescope de Newton.** — Nous avons vu que les *télescopes* ou *réflecteurs* ont comme objectif un miroir concave. Celui du télescope de Newton était un miroir sphérique métallique.

En M est l'objectif qui reçoit les rayons de l'astre (fig. 465) et en *m* un petit prisme rectangle de verre à réflexion totale. *Sans l'interposition* de ce prisme, il se produirait en A'F, au foyer *principal du miroir*, une image réelle, renversée et très petite,

de l'astre. Mais les rayons, réfléchis une première fois en M, sont interceptés par le prisme et réfléchis totalement sur l'hypoténuse, de sorte que l'image est rejetée en A'_1F_1, dans une position symétrique de A'F par rapport au plan *m* prolongé. On la regarde avec un oculaire très grossissant O, qui donne enfin l'image A''B'', virtuelle et très amplifiée.

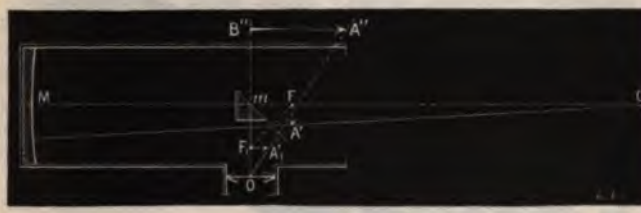


Fig. 465.

Grossissement. — Le grossissement linéaire se définit, dans les télescopes comme dans les lunettes : le rapport des diamètres apparents de l'image et de l'objet. On a donc

$$G = \frac{\text{angle } A''OB''}{\text{angle } A'CF}.$$

En substituant à ces angles leurs tangentes trigonométriques et en faisant les réductions ordinaires, on retrouve la formule générale $G = \frac{F}{f}$, F étant la distance focale principale du miroir-objectif, et *f* celle de la lentille-oculaire.

448. **Télescope de Foucault.** — Foucault, étant parvenu à argenter des miroirs de verre et à leur donner un poli assez parfait pour qu'ils pussent réfléchir 75 pour 100 de la lumière incidente, pensa à en faire l'application au télescope de Newton. Son premier miroir n'avait que 10 centimètres de diamètre; mais il en a successivement construit de 22 centimètres, de 33, de 42 et de 80.

Ces objectifs n'ont évidemment aucune aberration de réfrangibilité. Quant aux aberrations de sphéricité, Foucault est parvenu à les faire disparaître au moyen de la méthode dite des *retouches locales*.

Les nouveaux télescopes à miroir parabolique de verre argenté ont, sur les anciens télescopes à miroir sphérique de métal, le triple avantage de donner des images plus nettes et d'être moins lourds et moins longs : leur distances focale n'est que de six fois le diamètre du miroir (fig. 455 et 466).

Oculaire. — Pour simplifier la construction (fig. 465), nous avons supposé l'oculaire à un seul verre; mais celui de Foucault est un oculaire *à quatre verres* O, placé sur le côté du télescope (fig. 466), et qui, suivant son pouvoir grossissant et la dimension du miroir argenté, peut donner un grossissement de 50 à 800.

Description complète. — Le corps est de bois; il a la forme d'un gros tube octogonal (fig. 466). L'extrémité G est ouverte; à l'autre extrémité est le miroir.

Ce télescope est un instrument mobile, qu'on peut rouler à volonté sur une terrasse, de manière à observer un corps céleste quelconque; il ne pourrait servir aux mesures de précision. Les télescopes destinés à ces mesures sont installés *à poste fixe* et *équatorialement*.

Manipulation et mise au point. — Pour fixer le télescope en déclinaison,

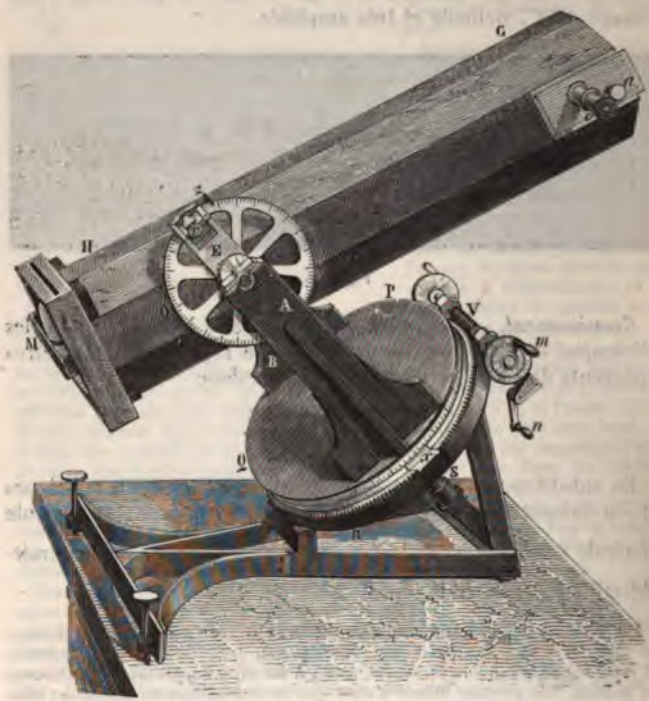


Fig. 466. — Petit télescope de Foucault.

une pièce de cuivre E, liée au montant A, porte une pince dans laquelle glisse le limbe O, et qui se serre par un bouton à vis *r*. Enfin, sur le côté de l'appareil est l'oculaire *o*, monté sur une plaque de cuivre à coulisse, qui porte aussi le petit prisme *m* représenté dans le schéma (fig. 465). Pour mettre l'image au point, il suffit de faire avancer ou reculer cette plaque au moyen d'une crémaillère et d'un bouton *a*. La manivelle *n* sert à *embrayer* ou *désembrayer* la vis V.

INSTRUMENTS OU APPAREILS DE PROJECTION.

449. **Définitions.** — On appelle *appareils de projection* des instruments d'optique réduits à un *système objectif* et destinés à projeter sur un écran blanc, dans la chambre noire, des images réelles et amplifiées des petits objets. Ceux-ci consistent ordinairement en tableaux transparents, peints ou photographiés sur verre, fortement éclairés (lanterne magique, microscope solaire, lanternes de projection). On peut également projeter des objets opaques, dont l'une des faces est éclairée par réflexion (mégascope). L'usage des appareils de projection s'est beaucoup répandu dans ces dernières années, au grand profit de la vulgarisation et de l'enseignement à tous les degrés et sous toutes ses formes.

450. **Lanterne magique.** — La *lanterne magique*, inventée par le P. Kircher, est le plus ancien des appareils de projection. Elle

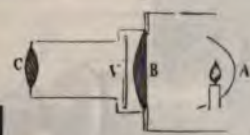


Fig. 468.

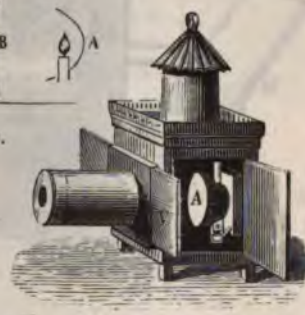


Fig. 467.

consiste en une boite de fer-blanc où l'on peut placer une source de lumière au foyer d'un réflecteur concave A (fig. 467 et 468). Les rayons réfléchis sont reçus sur une lentille convergente B, qui les concentre vers des figures diverses peintes sur une lame de verre V. Ces figures, ainsi éclairées fortement, sont placées devant une seconde lentille convergente C, à une distance un peu plus grande que sa distance focale principale. Cette lentille en donne une *image réelle, renversée* et très amplifiée, qui se projette *sur un écran convenablement* éloigné (fig. 467). Pour

obtenir des images droites, on place le verre peint, dans la lanterne, de manière que les dessins qu'il porte soient renversés.

Grossissement. — Le grossissement fourni par la lanterne magique est déterminé par la formule des lentilles. En appelant p' et p les distances de la lentille C à l'écran et à l'objet, on a

$$\frac{I}{O} = \frac{p'}{p} = \frac{f}{p-f}.$$

Par conséquent, si l'image est dix fois plus éloignée de la lentille que l'objet, le grossissement linéaire est égal à 10 et le grossissement superficiel égal à 100.

451. **Microscope solaire.** — Le *microscope solaire* est une sorte de lanterne magique, éclairée par les rayons solaires : c'est

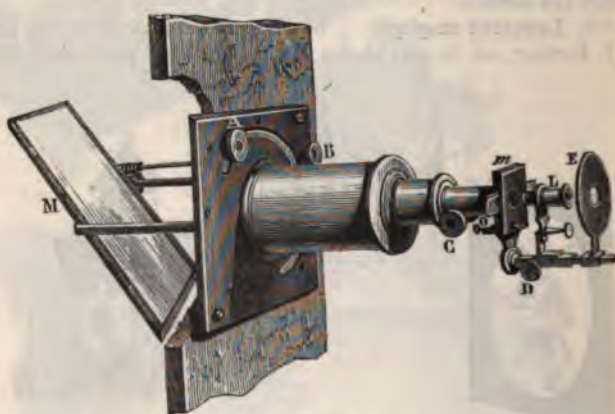


Fig. 469.

le type des appareils de projection. Cet appareil est fixé au volet de la chambre noire où l'on fait les projections

Description. — Un miroir plan M (fig. 469 et 470), placé hors de la chambre noire, et qu'on peut manœuvrer du dehors à l'aide du bouton B, reçoit les rayons solaires et les réfléchit vers une lentille convergente l ; celle-ci les concentre sur une seconde lentille o (fig. 469), nommée *focus*, qui les fait converger en son foyer. L'ensemble des lentilles l et o forme ce qu'on appelle *condensateur de lumière*. C'est près du foyer de ce système qu'on dispose l'objet dont on veut avoir l'image, afin de le bien éclairer ; il est placé

entre deux lames de verre, serrées elles-mêmes entre deux lames métalliques *m*, par un ressort à boudin placé en *n*. L'objet étant alors fortement éclairé est placé tout près du foyer d'un système convergent, composé de trois lentilles *x*; celles-ci en donnent une image *ab*, renversée et très amplifiée, sur un mur ou sur un écran blanc convenablement éloigné. Des vis à bouton C et D servent à régler les distances des lentilles *o* et *x* à l'objet, de manière que celui-ci soit exactement au foyer de la première, et que l'image donnée par les lentilles *x* se projette exactement sur l'écran.

Grossissement. — On le détermine en mettant à la place de l'objet un micromètre au $\frac{1}{10}$ ou au $\frac{1}{100}$ de millimètre. On mesure

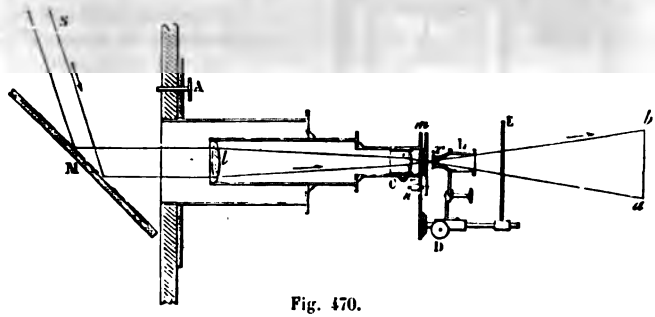


Fig. 470.

directement sur l'image l'intervalle grossi de deux de ces divisions, et on le divise par l'intervalle réel : le quotient est, *par définition*, le grossissement. Suivant le grossissement qu'il s'agit d'obtenir, l'objectif *x* est formé d'une, de deux ou de trois lentilles, toutes achromatiques.

Remarques. — *Emploi de l'héliostat.* — La direction de la lumière solaire variant constamment, il faut changer continuellement la position du réflecteur extérieur, afin que les rayons réfléchis soient constamment dirigés suivant l'axe du microscope. Ce résultat ne pourrait être rigoureusement obtenu qu'à l'aide d'un *héliostat*. On y arrive approximativement au moyen d'un double mouvement qu'on peut imprimer au miroir M, de l'intérieur de la chambre noire : d'abord, une rotation du miroir M autour d'un axe parallèle au plan du miroir au moyen d'une vis sans fin et d'un pignon B (fig. 469); ensuite, une rotation autour de l'axe général de l'instrument au moyen d'un bouton A, qui se meut dans une coulisse fixe et transmet son mouvement au miroir.

2° *Emploi d'un écran d'alun.* — Le microscope solaire a l'inconvénient de concentrer sur l'objet une chaleur très intense qui l'altère promptement. On y *remédie en interposant de l'eau* saturée d'alun, qui arrête une partie de la *chaleur, grâce à son athermanéité* (ou opacité pour la chaleur).

452. **Lanternes de projection.** — *Appareil Molteni.* — Le *microscope solaire* ne peut servir que dans le cas particulier où l'on peut disposer de la lumière solaire. Dans le cas général, on ne peut faire de projections qu'à l'aide d'une source de lumière artificielle, telle que la *lumière Drummond* ou la *lumière électrique* : on emploie alors des *lanternes* ou *appareils de projection*. Celui que représente la figure 471 est un des plus parfaits. Il a été construit par M. Molteni. Il est actuellement disposé pour la lumière Drummond[1], mais on pourrait le disposer pour l'arc voltaïque.

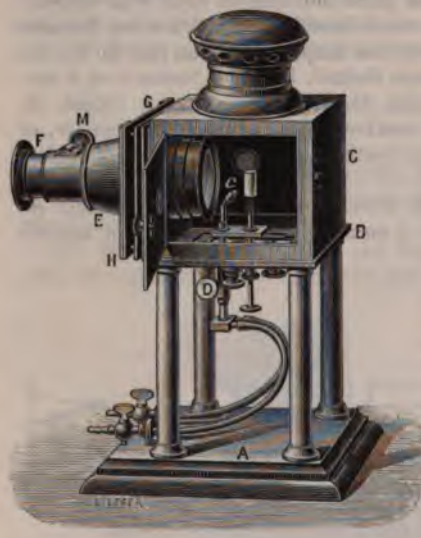


Fig. 471.

Le chalumeau à gaz oxyhydrique *c* est supporté par deux platines en cuivre accouplées, munies chacune d'un mouvement de rappel à crémaillère, ce qui permet de déplacer lentement le chalumeau soit de droite à gauche, soit d'avant en arrière. Une troisième crémaillère D permettant le déplacement dans le sens vertical, il est facile d'amener au point la source lumineuse par rapport aux systèmes réfringents de la lanterne.

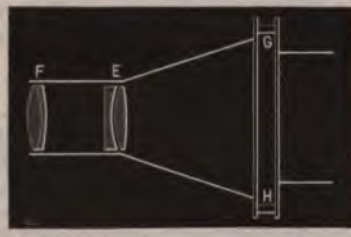


Fig. 472.

1. On sait que cette lumière est obtenue à l'aide d'un bâton de chaux, *rendu incandescent* par la flamme d'un double chalumeau à gaz oxygène et *hydrogène*.

Il y en a deux : le *condensateur de lumière*, composé de trois lentilles, et le cône de projection E, ordinairement formé de deux lentilles achromatiques E et F (fig. 472) ; sa monture est indépendante du condensateur, de sorte qu'on peut l'enlever ou le remettre à volonté sur l'appareil, de manière à projeter un faisceau de lumière parallèle ou convergent. La crémaillère M permet de faire varier la distance de l'objectif au tableau placé dans la coulisse GH. L'objectif est d'ailleurs indépendant du porte-crémaillère, dans lequel il entre à frottement et d'où on peut le retirer à volonté. On peut également enlever le cône ; la coulisse GH, qui reste attenante à l'appareil, peut recevoir les diverses pièces ou clichés à projeter.

Fig. 473.

Remarques. — 1° Lorsque l'appareil doit fonctionner à volonté, soit avec la lumière Drummond, soit avec l'arc voltaïque, les platines mobiles, au lieu d'être en haut des colonnes, sont placées sur le socle A, et elles peuvent alors recevoir soit un chalumeau, soit un régulateur.

2° *Support à réflexion totale.* — Dans certains cas on ne peut placer les objets à projeter que dans une position horizontale. On enlève alors le cône de projection E et on le remplace par un *support à réflexion totale* MEM' (fig. 473). Cet appareil se compose d'une première glace M inclinée à 45°, qui reçoit les rayons provenant du condensateur ; ceux-ci se réfractent dans l'objectif proprement dit E, d'où ils tombent sur une seconde glace M' également inclinée à 45° qui les renvoie alors horizontalement et projette l'image sur l'écran vertical.

453. Polyoramas ou Appareils à vues fondantes. — Avec les appareils ordinaires, lorsqu'un tableau a été projeté, il faut le retirer de la lanterne pour le remplacer par un autre. Pendant ce changement, on doit soit fermer l'objectif, soit laisser l'écran en pleine lumière : l'effet est fâcheux dans les deux cas. M. Molteni supprime cet inconvénient esthétique en employant des appareils spéciaux appelés *polyoramas*, où les projections se succèdent sans interruption en se fondant, pour ainsi dire, l'une dans l'autre. Voici le principe d'un polyorama à projection double.

Supposons deux lanternes A et B (fig. 474), montées sur une même tablette CD, avec laquelle elles sont articulées de manière qu'elles puissent faire converger leurs faisceaux lumineux vers une même région E de l'écran FG. Plaçons, par exemple, dans la lanterne A un paysage d'été, et dans la lanterne B le *même paysage vu en hiver. Le diaphragme de A étant ouvert complètement au début et celui de B fermé*, c'est la vue d'été qu'on aperçoit sur l'écran.

Mais si l'on ferme progressivement le diaphragme de A pendant qu'on ouvre de la même quantité le diaphragme de B, on voit disparaître progressivement le paysage d'été pendant que celui d'hiver se substitue pro-

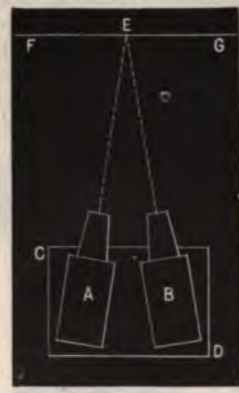


Fig. 474.

Fig. 475.

Fig. 476.

gressivement, en son lieu et place, sur la même région de l'écran. En somme,

les vues se sont ainsi *fondues* l'une dans l'autre, sans que le spectateur, placé de l'autre côté de l'écran, ait pu percevoir de quelle manière l'effet s'est produit.

Le *dissolver anglais*. — Différents dispositifs peuvent être employés pour réaliser cet effet curieux. Dans le *dissolver anglais* (fig. 475), une lame dentée A passe lentement devant l'un des objectifs *c* pendant qu'une deuxième lame B découvre simultanément l'autre objectif *c'*. Ce double mouvement est réalisé de l'extérieur par l'intermédiaire d'une vis à manette M.

Au lieu de juxtaposer les deux appareils horizontalement, on préfère les superposer. L'appareil double vertical (fig. 476) est celui qu'emploie de préférence M. Molteni. Il occupe moi[illegible] s, il est d'un transport plus facile et il a surtout l'avantage de permettre [illegible] opérateur de manœuvrer simultanément, sans changer de place, les [illegible] deux appareils[1].

Remarque. — On construit égale[illegible] lamas à trois, quatre et même cinq lanternes; mais, dans la p[illegible] ma à double lanterne est bien suffisant.

CHAPITRE VI

VISION[2]

454. Structure de l'œil humain. — L'*œil* est l'organe de la *vision*. La vision est le phénomène en vertu duquel la lumière émise ou réfléchie par les corps fait naître en nous la sensation qui nous décèle leur présence.

Situé dans une cavité osseuse qu'on nomme *orbite*, l'œil est maintenu par les *muscles* qui servent à le mouvoir, par le *nerf optique*, la *conjonctive*, les *paupières* et l'*aponévrose orbito-oculaire*. Tous ces liens, en lui assurant une contention solide, lui permettent des mouvements très variés et très étendus. Son volume est à peu près le même chez tous les individus; l'ouverture des paupières, qui est variable, le fait seul paraître plus ou moins volumineux.

Sa forme générale est celle d'un sphéroïde dont la courbure à la partie antérieure est plus grande qu'à la partie postérieure. Il est composé de plusieurs membranes et de milieux, analogues aux diverses pièces d'un instrument d'optique (fig. 477). Ce sont : la *cornée*, la *sclérotique*, l'*iris*, l'*humeur aqueuse*, le *cristallin*, le *corps*

1. Nous renvoyons le lecteur désireux d'apprendre le maniement de ces appareils au traité spécial de M. Molteni, intitulé : *Instructions pratiques sur l'emploi des appareils de projection*.

2. Ce chapitre a été revu par M. le Dr *Javal*, directeur du laboratoire d'ophtalmologie de *l'École des hautes études* (Sorbonne), membre de l'Académie de *Médecine*.

vitré, la *membrane hyaloïde*, la *rétine*, la *choroïde*, le *nerf optique*.

Cornée. — La cornée *a* est une membrane transparente située en avant du globe de l'œil. Elle a sensiblement la forme d'une petite calotte sphérique ayant une base de 11 à 12 millimètres de diamètre et un rayon de courbure de 8 millimètres. Sa circonférence, taillée en biseau aux dépens de sa face externe, s'enchâsse dans la sclérotique *i*, et l'adhérence de ces deux membranes est telle, qu'elles ont été considérées par quelques anatomistes comme une seule et même membrane.

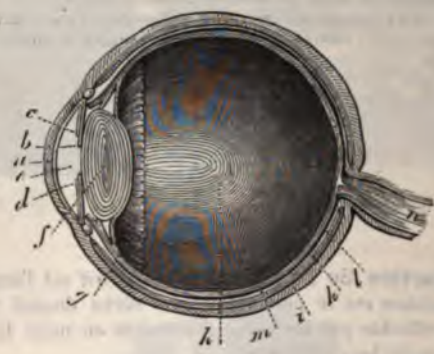


Fig. 477.

Sclérotique. — La sclérotique *i* est une membrane blanche qui, avec la cornée, enveloppe toutes les parties constituantes de l'œil. Elle présente, à la partie antérieure, une ouverture à peu près circulaire, dans laquelle est enchâssée la cornée; à la partie postérieure et interne, elle est perforée pour donner passage au nerf optique.

Iris et *pupille*. — L'iris *d* est un diaphragme annulaire, opaque, adhérent par son périmètre extérieur, et libre par son bord central. Cette membrane est placée entre la cornée et le cristallin. C'est elle qui forme la partie colorée de l'œil; elle est percée, non pas à son centre, mais un peu en dedans, d'une ouverture qu'on nomme *pupille*, et qui chez l'homme est *circulaire*. Chez quelques animaux, elle est étroite et allongée dans le sens *vertical*, particulièrement chez ceux du genre *felis*, et dans le sens *transversal* chez les ruminants.

C'est par la pupille que les rayons lumineux pénètrent dans *l'œil. Son diamètre*, variable pour un même individu, est en

moyenne de 3 mm à 5 mm; mais ces limites peuvent être dépassées. Les alternatives d'agrandissement et de resserrement de la pupille s'opèrent rapidement; elles sont fréquentes et jouent un rôle important dans le phénomène de la vision. La pupille se contracte sous l'influence d'une vive lumière; elle se dilate au contraire dans l'obscurité. Les mouvements de l'iris sont *involontaires*.

L'iris est donc un écran à ouverture variable, dont la fonction est de régler la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil. L'iris sert encore à corriger l'aberration de sphéricité, en empêchant les rayons marginaux de traverser les bords du cristallin : il remplit, à l'égard de l'œil, le rôle du diaphragme dans les instruments d'optique.

Humeur aqueuse. — Entre la partie postérieure de la cornée et la partie antérieure du cristallin, il y a un liquide transparent qu'on appelle *humeur aqueuse*. L'espace *e*, occupé par cette humeur, semble partagé en deux compartiments par l'iris; la partie *b*, comprise entre la cornée et l'iris, se nomme *chambre antérieure*; la partie *c*, qui est entre l'iris et le cristallin, est la *chambre postérieure*; mais l'existence de la chambre postérieure est contestée.

Cristallin, capsule du cristallin, humeur de Morgani. — Le cristallin est un corps lenticulaire *f*, placé derrière l'iris et au contact de cette membrane. Remarquable par sa transparence, le cristallin est enveloppé dans une membrane, diaphane comme lui, qu'on nomme sa *capsule*, et qui adhère par son bord à la couronne annulaire formée par les *procès ciliaires g*. Sa face antérieure a une convexité moindre que la face postérieure. Son tissu est composé d'une suite de lamelles à peu près concentriques, plus dures au centre qu'à la circonférence. Les couches les plus superficielles ont une mollesse telle, qu'elles sont presque à l'état liquide. On leur a donné le nom d'*humeur de Morgani*. Leur pouvoir réfringent décroît du centre à la périphérie [1].

Corps vitré, membrane hyaloïde. — On appelle *corps vitré* ou *humeur vitrée* une masse transparente, comparable à l'albumine de l'œuf, qui occupe toute la partie *h* du globe de l'œil située en arrière du cristallin. Le corps vitré est enveloppé par la *membrane hyaloïde l*, qui tapisse la face postérieure de la capsule cristalline et toute la face interne d'une autre membrane qu'on nomme *rétine*.

1. *Opération de la cataracte.* — Le *cristallin* peut devenir *opaque* par suite d'une maladie de l'œil nommée *cataracte*. L'opération dite de la cataracte consiste dans la suppression, par différents moyens chirurgicaux, de ce cristallin opaque, devenu un obstacle à l'entrée de la lumière dans l'œil.

Rétine, nerf optique, tache jaune (*macula lutea*) et *fovea centralis.* — La *rétine m* est une membrane destinée à recevoir l'impression de la lumière et à la transmettre au cerveau par l'intermédiaire d'un nerf *n*, nommé le *nerf optique*, qui s'épanouit sur la rétine sous la forme d'un réseau et met cette membrane en communication avec le cerveau. La partie la plus sensible de la rétine porte le nom de *tache jaune* ou *macula lutea*. Le centre de cette tache possède le maximum de sensibilité; on appelle ce point *fovea centralis*.

Remarques. — 1° La rétine et le nerf optique ne jouissent que de la propriété spéciale de recevoir et de transmettre au cerveau l'impression des images. La blessure de ces organes produit des sensations lumineuses.

2° *Rouge rétinien.* — La découverte du *rouge rétinien*, faite par Boll, démontre qu'il se passe dans la rétine des phénomènes chimiques qui rendent plus complète encore l'assimilation classique de l'œil à une chambre noire photographique.

Choroïde, procès ciliaires. — La choroïde *k* est une membrane interposée entre la rétine et la sclérotique. Elle est essentiellement vasculaire et recouverte, sur sa face interne principalement, d'une matière noire, semblable au pigment de la peau des nègres, qui est destinée à absorber les rayons qui ne doivent pas coopérer à la vision.

La choroïde se prolonge en avant en formant une suite de replis saillants *g*, qu'on nomme *procès ciliaires*, et qui s'engagent entre l'iris et la capsule cristalline, à laquelle ils adhèrent, en formant autour d'elle un disque assez comparable à celui d'une fleur radiée.

Indices de réfraction des milieux transparents de l'œil. — Les indices de réfraction des milieux transparents de l'œil ont été déterminés par Brewster. Ils sont réunis dans le tableau suivant, avec celui de l'eau comme terme de comparaison :

Eau	1,3358	Enveloppe extérieure du cristallin.	1,3767
Humeur aqueuse . . .	1,3366	Centre du cristallin.	1,3990
Humeur vitrée	1,3394	Indice moyen du cristallin. . . .	1,3859

455. **Marche des rayons dans l'œil.** — On peut comparer cet organe à une chambre obscure dont la pupille serait l'ouverture, dont la cornée et le cristallin constitueraient la lentille convergente, et la rétine l'écran sur lequel va se peindre l'image.

Soit, en effet, un objet AB (fig. 478) placé en avant de l'œil, et *considérons* les rayons émis d'un point quelconque A de cet objet

vers l'œil. A leur entrée dans la cornée, ils éprouvent une première réfraction qui les rapproche de l'axe *Oo*, mené par le centre optique du cristallin ; puis ils rencontrent le cristallin, qui les réfracte de nouveau comme une lentille biconvexe ; et enfin, après avoir subi une dernière réfraction dans l'humeur

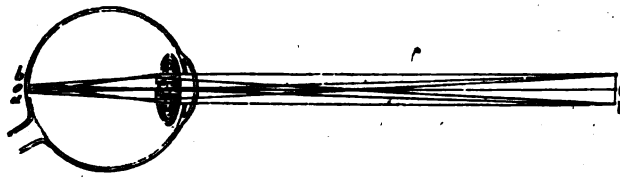


Fig. 478.

vitrée, ils vont concourir en un point *a* et y former l'image du point A. Les rayons partis du point B allant de même former en *b* l'image de ce point, il en résulte une image *ab* très petite, réelle et renversée, qui se forme exactement sur la rétine quand l'œil est bien conformé.

456. Ligne visuelle. — Angle des lignes visuelles. — Angle visuel. — On nomme *ligne visuelle* la ligne qui joint le point lumineux qu'on regarde à la *fovea centralis*. Cette ligne ne coïncide pas exactement avec l'axe de figure de l'œil.

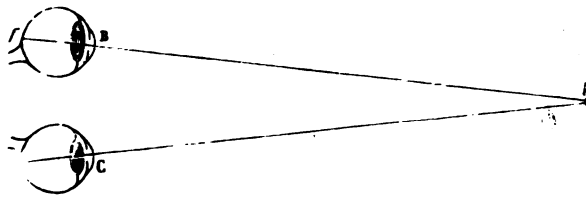


Fig. 479.

On appelle *angle des lignes visuelles* l'angle *fAf'* (fig. 479) formé par les deux lignes visuelles qui correspondent à un même point lumineux A.

L'*angle visuel* ou *diamètre apparent* d'un objet AB est l'angle AOB (fig. 480) sous lequel est vu cet objet ; il est formé par les lignes visuelles OA et OB. Pour une même distance, cet angle croît avec *la grandeur de l'objet*, et, pour un même objet, il *décroît quand la distance augmente*. Il résulte de là que les objets

paraissent d'autant plus petits qu'ils sont plus éloignés ; car, les axes secondaires AO et BO se croisant au centre du cristallin, la

Fig. 480.

grandeur de l'image projetée sur la rétine dépend de la grandeur de l'angle visuel AOB.

457. Appréciation de la distance et de la grandeur des objets. — L'appréciation de la distance et celle de la grandeur dépendent de plusieurs éléments l'angle visuel, la comparaison avec des objets de grandeur connue, la diminution de netteté de l'image par l'interposition d'un air plus ou moins vaporeux.

Lorsque la grandeur d'un objet est connue, comme la taille d'un homme, la hauteur d'un arbre ou d'une maison, on en apprécie la distance par l'ouverture de l'angle visuel sous lequel on le voit. Si la grandeur de l'objet est inconnue, on la juge relativement à celle des objets qui l'entourent.

Une colonnade, une avenue d'arbres, nous paraissent diminuer de grandeur à mesure que leur distance augmente, parce que l'angle visuel décroît ; mais l'habitude de voir des colonnes, des arbres, avec la hauteur qui leur convient, fait que notre jugement rectifie l'apparence produite par la vision. De même, quoique des montagnes fort éloignées soient vues sous un fort petit angle et n'occupent qu'un faible espace dans le champ de la vision, comme nous sommes habitués aux effets de perspective aérienne, nous leur restituons instinctivement leur grandeur réelle.

458. Vue simple avec les deux yeux ou **vision binoculaire.** — Lorsque les deux yeux se fixent sur un même objet, il se forme sur chaque rétine une

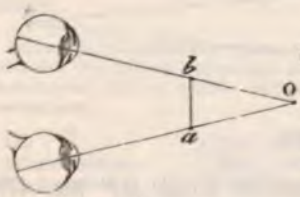


Fig. 481.

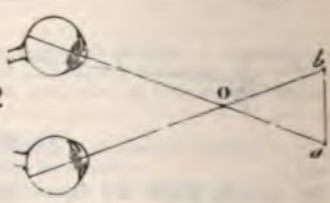


Fig. 482.

image, et cependant nous ne voyons qu'un objet. Pour expliquer la vue simple avec les deux yeux, l'hypothèse la plus plausible est celle de Brewster. Il attribue l'unité de sensation à l'habitude que nous acquérons de rapporter à un même objet les impressions simultanées de nos deux rétines.

Voici les principaux faits qui s'observent dans la vision *binoculaire*.

1° *On* voit plus clair avec deux yeux qu'avec un. En effet, si l'on regarde un

objet d'abord avec un seul œil, puis avec les deux, la différence d'éclat est sensible.

2° Lorsque les deux yeux sont fixés chacun sur un objet différent, de manière que les deux axes optiques concourent au delà ou en deçà de ces objets, il peut se produire des illusions d'optique remarquables. Par exemple, si l'on regarde deux objets identiques et de petites dimensions *a* et *b*, au moyen de deux tubes isolants qui donnent aux axes optiques de deux yeux les directions concourantes *a*O et *b*O (fig. 481), on ne voit qu'un objet unique, mais plus éloigné: il paraît situé au point de rencontre O des deux axes.

Si le point de croisement des deux axes est en avant des points qu'on regarde (fig. 482), on ne voit encore qu'un seul objet, mais plus près, au point O.

Ces diverses expériences démontrent que les impressions dans les deux yeux sont simultanées et se superposent pour donner une sensation unique.

459. **Cause du relief apparent des corps. — Stéréoscope.** — Il résulte d'expériences dues à Wheatstone que la vision binoculaire peut seule donner une perception nette du *relief* des corps, c'est-à-dire de leurs trois dimensions. Il est même certain qu'avec un seul œil le relief ne nous paraît appréciable que parce que les objets que nous regardons nous sont généralement connus et que nous *interprétons* les ombres. Wheatstone **a constaté par l'expérience que c'est bien de la perception simultanée de ces deux images que résulte le relief apparent des corps. Il imagina pour cela (en 1838) le *stéréoscope*[1], appareil à l'aide duquel on voit en relief, sur une surface plane, les images d'objets à trois dimensions.**

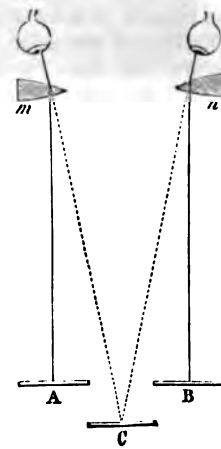


Fig. 483.

Principe de l'instrument. **— On place devant chaque œil une image différente d'un même objet, l'une avec la perspective correspondant à l'œil droit, et l'autre avec celle qui correspond à l'œil gauche, lorsqu'ils regardent cet objet à une petite distance. Si l'on dispose alors l'appareil de manière que, l'œil droit ne voyant que l'image qui lui est destinée, et l'œil gauche l'autre, les deux images se superposent, il est évident qu'il doit se former sur chaque rétine exactement la même image que si l'on regardait l'objet lui-même. Et en effet, on obtient ainsi une perception tellement vive et distincte du relief, que l'illusion est complète et vraiment surprenante.**

Dans le stéréoscope construit par Wheatstone, c'était par la réflexion sur deux miroirs plans qu'on obtenait la superposition des deux images. Brewster la réalisait à l'aide de deux lentilles convergentes identiques[2].

Marche des rayons. **— En A et B (fig. 483) sont les dessins que doivent regarder les deux yeux séparément. Au-dessus sont deux lentilles *m* et *n*, qui sont respectivement les oculaires des deux yeux. Or, les rayons partis de deux points homologues des images se réfractent à leur passage dans ces lentilles, et prennent les mêmes directions que s'ils étaient partis d'un point unique C. C'est**

1. Du grec, σκοπεῖν et στερεός, qui signifie *voir solide*.

2. Brewster réalisait cette identité en coupant en deux une lentille biconvexe, et en plaçant la moitié droite devant l'œil gauche, puis la moitié gauche devant l'œil droit (fig. 483).

donc là que se superposent les images virtuelles des dessins A et B, et qu'apparaît l'objet avec un relief d'une fidélité parfaite.

460. Région insensible de la rétine : Punctum cæcum. — La rétine n'est pas également sensible dans toutes ses parties, ainsi que le prouve l'expérience suivante, due à Mariotte. On marque deux points noirs sur un papier blanc, à quelques centimètres de distance l'un de l'autre, puis, le papier étant très rapproché de l'œil, on fixe le point de gauche avec l'œil droit en fermant l'œil gauche, ce qui n'empêche pas de voir l'autre point; mais si l'on éloigne lentement le papier, le point de droite disparaît au moment où l'on atteint une certaine distance, pour reparaître bientôt si l'on continue à éloigner le papier. La même chose a lieu si l'on regarde le point de droite avec l'œil gauche.

Mariotte a remarqué qu'au moment où le point cesse d'être visible, son image se projette sur l'insertion même du nerf optique. On a donné le nom de *punctum cæcum* à ce point qui paraît insensible à l'action de la lumière.

461. Persistance de l'impression sur la rétine. — Lorsqu'on fait tourner rapidement un charbon incandescent, on aperçoit comme un ruban de feu continu; de même, la pluie qui tombe sous forme de grosses gouttes apparaît dans l'air comme une suite de filets liquides. Ces différentes apparences sont dues à ce que l'impression des images sur la rétine persiste encore après que l'objet qui l'a produite a disparu ou s'est déplacé. La durée de cette persistance varie avec la sensibilité de la rétine et l'intensité de la lumière. Plateau a trouvé qu'elle est en moyenne d'une demi-seconde.

L'impression des couleurs persiste aussi bien que celle de la forme des objets; car si l'on fait tourner des cercles divisés en secteurs peints de diverses couleurs, alors celles-ci se confondent et donnent la sensation de la couleur qui résulterait de leur mélange. Le bleu et le jaune donnent le vert; le jaune et le rouge, l'orangé; le bleu et le rouge, le violet; et la série des sept couleurs du spectre donne le blanc (disque de Newton, 412, 5°).

Il existe plusieurs appareils curieux dont les effets s'expliquent par la persistance de la sensation sur la rétine. Tels sont le *thaumatrope*, le *phénakisticope*, la *roue de Faraday*, le *caléidophone*.

462. Contraste des couleurs. — Loi de Chevreul. — Le *contraste des couleurs* est une réaction réciproque entre deux couleurs voisines d'où résulte qu'à chacune d'elles s'ajoute la couleur complémentaire de l'autre. Ce contraste a été observé par M. Chevreul, qui en a fait une étude approfondie et en a donné la loi.

M. Chevreul a trouvé que, les couleurs rouge et orangé étant juxtaposées, le

rouge tire sur le violet, et l'orangé sur le jaune. Avec le rouge et le bleu, la première couleur tire sur le jaune et la seconde sur le vert; avec le jaune et le bleu, le jaune passe à l'orangé et le bleu à l'indigo; et ainsi de suite pour un grand nombre de combinaisons. On conçoit combien il importe, dans la fabrication des étoffes, des tapis, de savoir apprécier l'effet dû au contraste des couleurs.

463. Distance de la vision distincte. — On appelle *distance de la vision distincte* la distance à laquelle les objets doivent être placés pour être vus nettement. Si le pouvoir réfringent de l'œil était invariable, il n'y aurait qu'une seule distance pour laquelle les objets extérieurs viendraient former une image nette sur l'écran rétinien : il n'y aurait donc, pour chaque individu, qu'une *seule distance de la vision distincte*. Cependant l'expérience prouve que l'œil peut *voir nettement* à des distances très variables, à partir d'une distance minimum, qu'on doit appeler *punctum proximum* et qu'on appelle communément *distance minimum de la vision distincte*. Elle est variable avec les individus, et parfois, pour le même individu, d'un œil à l'autre.

Toutefois, si nous pouvons voir nettement à des distances très inégales, nous ne le pouvons pas simultanément. En effet, si l'on regarde à travers un voile de gaze placé à 20 ou à 30 centimètres de l'œil, on peut voir nettement, au choix, mais successivement, soit le voile, soit les objets éloignés. Donc, quand l'œil est disposé pour voir à une certaine distance, il ne l'est pas pour voir à une autre, mais il peut successivement s'adapter à l'une et à l'autre.

464. Accommodation. — Cette *adaptation de l'œil* à des distances variables ne peut se faire que par une sorte de mise au point spontanée de l'écran rétinien par rapport aux objets extérieurs diversement éloignés. Or, la distance du fond de l'œil, c'est-à-dire de l'écran à la cornée, étant constante, la mise au point ne peut s'effectuer que par une modification dans le pouvoir réfringent du système dioptrique de l'œil. Cette mise au point *spontanée* est ce qu'on appelle l'*accommodation*. Elle consiste en une augmentation de convexité du cristallin, produite par la contraction des procès ciliaires, muscles qui l'embrassent circulairement. Le cristallin devient d'autant plus bombé que le muscle ciliaire se contracte davantage. Quand le muscle est extrêmement relâché, l'action réfringente du cristallin est faible; elle atteint son maximum en même temps que la contraction du muscle[1].

1. Dr Javal, Sur les maladies de l'œil, *Revue scientifique* du 27 septembre 1879.

465. **Vue normale. — Œil emmétrope.** — Un œil est dit *emmétrope*[1] lorsqu'il est doué d'une vue *normale*. Les dimensions de son appareil dioptrique sont telles, que les objets lointains viennent se peindre nettement sur la rétine lorsque le muscle de l'accommodation est au repos. L'image des objets plus ou moins voisins ne s'y fait nettement que grâce à un *effort d'accommodation* plus ou moins grand, qui donne au cristallin le pouvoir convergent nécessaire pour la mise au point.

Le *punctum remotum*, c'est-à-dire le point le plus éloigné de la vision distincte, est *à l'infini* pour un œil emmétrope. Dans la pratique, la distance des objets visibles est limitée par la nécessité de produire sur la rétine des images qui ne soient ni trop petites, ni trop faibles pour impressionner le nerf optique : leur distance maximum dépend donc à la fois de leur grandeur et de leur éclat. Quant au *punctum proximum*, il ne dépend que de la force accommodatrice dont l'œil peut disposer : il est d'autant plus près que le cristallin est plus souple et le muscle ciliaire plus fort. Le docteur Javal a donné le nom, devenu classique, de *parcours de l'accommodation* à la distance qui sépare le *punctum proximum* du *punctum remotum*.

Quand on reste dans les limites du parcours de l'accommodation, la visibilité des objets, pour un œil emmétrope, dépend du rapport de leur grandeur à leur distance. L'œil qui peut distinguer des lettres de 1/4 de millimètre à la distance de 25 centimètres, lira aussi bien des lettres de 1 centimètre à 10 mètres et des lettres de 1 mètre de haut à 1 kilomètre. Mais au delà du *punctum remotum* et en deçà du *punctum proximum* cette règle de la visibilité ne s'applique plus. Ainsi, ce même œil emmétrope ne lira pas de lettres de 1/10 de millimètre, parce qu'il faudrait les rapprocher à 10 centimètres, c'est-à-dire en deçà du *punctum proximum* normal.

466. **Presbytie. — Besicles ou lunettes à verres convexes.** — Avec les progrès de l'âge, le cristallin devient moins souple et les muscles ciliaires moins forts. Il en résulte que la force d'accommodation de l'œil diminue et que le *punctum proximum* s'éloigne. Cet écart s'effectue graduellement et atteint, vers l'âge de quarante à quarante-cinq ans, une valeur telle, que les objets tenus à la main se trouvent placés en deçà du *punctum proximum*. A ce moment, l'œil emmétrope est devenu un *œil presbyte*. Cette infirmité de l'œil est la *presbytie*.

On remédie à la presbytie, ainsi qu'aux autres infirmités de

1. Ἐν μέτρον, conforme à la mesure, et ὤψ, œil.

l'œil, au moyen de simples verres oculaires, appelés vulgairement *lunettes* ou proprement *besicles*. Les verres de lunettes sont généralement fabriqués en crown-glass. Ils sont *convexes* ou *concaves* et ordinairement *sphériques*; on construit aussi depuis quelque temps des verres *cylindriques*. On inscrit sur ces verres des numéros qui indiquent, en *pouces*, le rayon de courbure commun à leurs deux surfaces. Pour les verres en crown, par suite de la valeur de l'indice moyen, ce rayon est exprimé par le même nombre que la distance focale principale[1]. Par conséquent, un verre en crown marqué n° 20 est un verre de 20 pouces de foyer ou de 20 pouces de courbure[2].

On emploie pour les presbytes des *besicles à verres convexes*. En effet, la convexité du verre vient s'ajouter à celle du cristallin de manière à corriger le défaut de pouvoir convergent, et le *punctum proximum* est rapproché suffisamment pour permettre la lecture, si les verres sont convenablement choisis.

Mais ce remède n'est pas sans inconvénients, car tout le parcours de l'accommodation se trouve déplacé en même temps, et le *punctum remotum* est rapproché en même temps que le *punctum proximum* : aussi le presbyte ne peut-il plus voir nettement les objets lointains à travers ses lunettes : il est obligé de regarder par-dessus.

Il y a une connexité remarquable entre l'âge du presbyte et le degré de la presbytie. En effet, on peut déduire, à trois ou quatre ans près, l'âge d'un individu *emmétrope* de la distance de son *punctum proximum*. De plus, les divers numéros de verres convexes, 48, 24, 16, 12, 10, correspondent généralement aux âges de 48, 54, 60, 66, 72 et 78 ans.

467. **Myopie. — Besicles ou lunettes à verres concaves.** — L'*œil myope* est caractérisé anatomiquement par un diamètre antéro-postérieur *plus grand* que celui de l'œil emmétrope. Il résulte de cet allongement plus ou moins exagéré de l'organe une réduction plus ou moins forte du parcours de l'accommodation : le *punctum remotum* n'est plus à l'infini, mais à une distance

1. En effet, si dans la formule du *pouvoir convergent* (395) on fait $R = R'$ et $n = \frac{3}{2}$, il vient $\frac{1}{f} = \frac{1}{R}$.

2. On compte aussi par *dioptries*, en appelant dioptrie l'*inverse de la distance focale principale*, évaluée en mètres : ainsi une lentille de 0,25 m. de distance focale aura 4 *dioptries*. On passe des anciens numéros, N, aux nouveaux, D, en posant soit ND = 38, soit ND = 40. La première convention revient à admettre que le mètre vaut 38 pouces. La seconde corrige en outre l'erreur provenant de ce que l'*indice du verre n'est pas* exactement 1,5, comme on l'admettait dans l'*ancienne numération*.

plus ou moins faible, et le *punctum proximum* est beaucoup plus voisin de l'œil myope que d'un œil emmétrope du même âge. M. Javal appelle *myopie légère* celle où le *punctum remotum* est au delà de 33 centimètres, *myopie moyenne* celle où il est compris entre 33 centimètres et 10 centimètres, et *myopie forte* celle où la distance maximum de la vision distincte est inférieure à 10 centimètres.

L'écran rétinien étant à une distance plus grande de l'appareil dioptrique de l'œil, l'image nette des objets éloignés doit se former en avant de la rétine; tout se passe comme si l'œil avait un excès de pouvoir convergent. On comprend donc qu'on puisse corriger cette infirmité par l'usage de besicles *à verres concaves*, qui diminuent la convergence des faisceaux lumineux pénétrant dans l'œil, et leur permettent d'aller former leurs foyers sur la rétine.

La myopie n'est pas, comme la presbytie, une simple infirmité se développant avec l'âge, d'une manière régulière et pour ainsi dire indépendante de l'usage des besicles. C'est une *maladie de l'œil*, d'autant plus dangereuse qu'elle se développe lentement, sans douleur, et *progressivement* lorsqu'on n'en prend pas soin, jusqu'à ce que l'allongement graduel du globe oculaire et la distension de la rétine qui en résulte, suppriment la perception des images nettes, pour les objets rapprochés aussi bien que pour les objets lointains.

Remarquons en outre que les personnes affectées de myopie légère peuvent devenir presbytes. Il suffit pour cela que leur *punctum proximum* aille rejoindre leur *punctum remotum*, lequel est distant de plus de 33 centimètres. Cela peut arriver naturellement, avec les années, par suite d'une diminution graduelle dans le parcours de l'accommodation. Dans ce cas, la vision nette des objets très rapprochés ne pourra être obtenue qu'à l'aide de verres convexes.

468. **Hypermétropie.** — C'est une infirmité causée par une déformation anatomique exactement opposée à celle qui constitue la myopie : l'*œil hypermétrope* est plus court que l'*œil emmétrope*. Il en résulte une réduction du parcours d'accommodation, non pour les points éloignés de l'œil comme dans la myopie, mais pour les points voisins : le *punctum proximum* se trouve plus ou moins reculé, suivant le degré de l'hypermétropie. La vision des objets éloignés reste donc parfaitement nette, de sorte que l'infirmité peut passer inaperçue lorsqu'elle est faible. Les personnes *légèrement* hypermétropes en sont quittes pour devenir presbytes *un peu plus tôt* que les emmétropes et pour faire usage de verres *convexes un peu* plus forts que les verres suffisants pour les em-

métropes du même âge. L'hypermétropie, plus ou moins forte, est d'ailleurs parfaitement corrigée par l'usage des verres convexes, car ceux-ci, en rendant plus convergents les rayons lumineux émanés des objets voisins, leur permettent d'aller faire leur image sur l'écran rétinien.

Les hypermétropes âgés, surtout si leur hypermétropie est forte, trouvent grand avantage à porter des verres convexes pour voir au loin.

469. Astigmatisme. — C'est le défaut de l'œil à la fois le plus fréquent et le moins connu. Chez toutes les personnes dont la vue est mauvaise et délicate, chez tous les myopes qui ne voient pas parfaitement bien au loin, malgré le secours des verres concaves, chez les presbytes qui ne parviennent pas à trouver des besicles convexes leur permettant de lire sans fatigue, il y a lieu de suspecter l'existence de l'*astigmatisme*[1]. Il faut encore le rechercher chez les personnes affectées de strabisme ou même d'une simple inégalité de force dans les deux yeux. Ce défaut se traduit encore bien souvent par du larmoiement, ou par des inflammations de la paupière ou de la conjonctive, qui sont rebelles à toute espèce de traitement.

La cause anatomique de l'astigmatisme est une *difformité du globe oculaire* les milieux réfringents de l'œil *astigmate*, au lieu d'être des solides de révolution autour de son axe antéro-postérieur, sont assimilables à des fragments d'ellipsoïdes à axes inégaux.

La conséquence physiologique est la suivante. Supposons, par exemple, qu'un œil emmétrope subisse un léger aplatissement, de telle sorte que son diamètre vertical devienne plus petit que son diamètre horizontal : l'œil deviendra myope dans le méridien vertical, tout en restant emmétrope dans le méridien horizontal; il verra donc parfaitement les lignes verticales éloignées, tandis que les lignes horizontales lui paraîtront moins nettes. Ce caractère de l'astigmatisme n'est pas absolu. Il peut arriver que le défaut soit assez fort chez certaines personnes pour affaiblir notablement la vue, sans qu'elles se soient jamais aperçues de l'inégale netteté des lignes horizontales et des lignes verticales. M. Javal a démontré récemment que chez les jeunes gens le cristallin peut se déformer spontanément *de manière à compenser l'astigmatisme de la cornée*. Cette découverte explique pourquoi l'astigmatisme passe si souvent inaperçu, tout en étant une cause de fatigue considérable.

Besicles cylindriques. — Ophthalmomètre de Javal et Schiötz. — Il est évident qu'on ne peut remédier à cette infirmité avec des verres sphériques, les seuls que vendent ordinairement les opticiens, mais avec des verres qui agissent inégalement dans les différents méridiens de l'œil. L'astigmatisme, découvert par Thomas Young, a été corrigé pour la première fois par l'astronome Airy, au moyen de *verres cylindriques*.

Le docteur Javal a démontré que, si l'on assimile l'œil à un ellipsoïde à trois axes inégaux, tout verre cylindrique capable de ramener à l'égalité de réfringence les deux arcs situés dans le plan perpendiculaire à l'axe antéro-postérieur ramène en même temps tous les autres méridiens de l'œil au même pouvoir réfringent. La correction de l'astigmatisme se fera donc par l'emploi d'un *verre cylindrique approprié*. Ce problème est résolu avec précision et rapidité, du moins dans le cas de l'astigmatisme cornéen, à l'aide d'un ophtalmomètre inventé en 1881 par MM. Javal et Schiötz.

470. Diplopie. — La *diplopie* est une affection de l'œil qui fait qu'on voit les

1. Dr Javal, *Des maladies de l'œil.*

objets doubles, c'est-à-dire qu'on en voit deux au lieu d'un. La diplopie peut résulter d'une paralysie des muscles qui font mouvoir les yeux, par suite de laquelle les deux yeux cessent de converger vers le même point. Cette maladie peut aussi n'affecter qu'un seul des yeux. Ce dernier cas est dû à de l'astigmatisme irrégulier. Un seul œil peut être même affecté de *triplopie* ou de *polyopie*.

471. **Achromatopsie** ou **Daltonisme**. — On nomme *achromatopsie* une affection singulière qui nous rend incapables de juger des couleurs, ou du moins de certaines couleurs. Chez quelques personnes, en effet, l'insensibilité est complète, tandis que d'autres apprécient quelques couleurs. Les *daltoniques* (de Dalton qui avait cette infirmité) distinguent très bien les contours des corps, les parties claires ou dans l'ombre, mais elles n'en distinguent pas les teintes.

472. **Ophthalmoscope** — L'*ophthalmoscope*[1] est un instrument destiné à examiner l'œil. Il se compose : 1° d'un réflecteur sphérique concave M, de verre

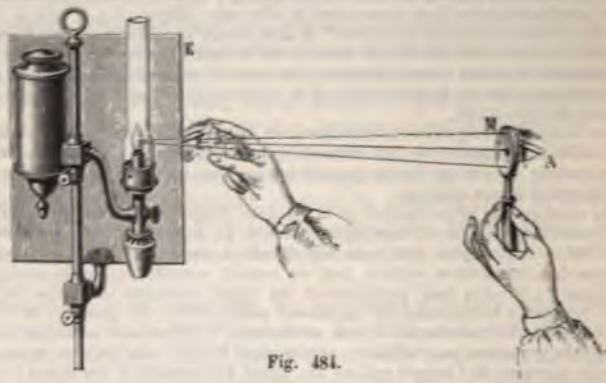


Fig. 484.

ou de métal (fig. 484 et 485), d'une distance focale de 20 à 25 centimètres, et percé à son centre d'un trou de 2 millimètres de diamètre; 2° d'une lentille convergente achromatique *o*, qu'on maintient devant l'œil qu'on veut explorer; 3° de plusieurs lentilles, les unes divergentes, les autres convergentes, qu'on fixe par une pince derrière le miroir, afin de corriger au besoin la vue de l'observateur, s'il est myope ou presbyte. Le réflecteur M est percé d'un trou à son centre quand il est métallique; mais s'il est de verre, on enlève seulement à la partie centrale la couche de tain qui recouvre la face postérieure.

2° *Usage*. — Pour se servir de l'ophthalmoscope, on place le sujet dans une chambre obscure, et l'on met à côté de lui une lampe dont le pied porte un écran E, destiné à arrêter la lumière du côté de la tête du sujet et à la maintenir dans l'obscurité.

L'observateur, tenant alors d'une main le réflecteur M, le dirige de manière à concentrer vers l'œil B du sujet la lumière envoyée par la lampe, tandis que de l'autre main il maintient devant l'œil la lentille *o*. Par ce dispositif, le fond de l'œil se trouvant fortement éclairé, on en distingue très bien les lésions.

1. *L'ophthalmoscope*, inventé par M. Helmholtz, est décrit en détail dans son *Optique physiologique*; nous renvoyons à ce beau livre pour tout ce qui concerne la vision.

La figure 485 indique une expérience faite dans le cas d'un œil myope. Soit d'abord le cas où la lentille *o* n'est pas maintenue devant l'œil B : les rayons qui éclairent le fond de l'œil étant renvoyés vers le cristallin *c*, le traversent en se réfractant comme dans une lentille et vont former en *a' b'* une

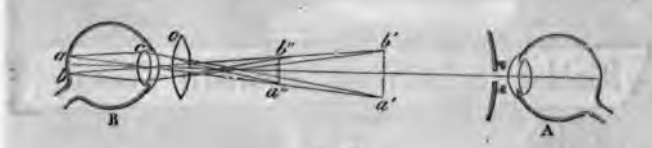


Fig. 485.

image aérienne, réelle et renversée de la partie *ab* du fond de l'œil. C'est cette image que l'observateur voit par le trou du miroir. Si l'on interpose la lentille *o*, les rayons se réfractant de nouveau en la traversant, l'image va se former en *a'' b''*, plus près de l'œil malade et, par suite, plus nette et plus facile à observer.

CHAPITRE VII

NOTIONS D'OPTIQUE PHYSIQUE

—

DOUBLE RÉFRACTION. — INTERFÉRENCES. — POLARISATION.

—

DOUBLE RÉFRACTION.

473. Définitions. — Préliminaires. — On a déjà vu (376) que la *double réfraction* est la propriété que possèdent un grand nombre de cristaux, dits *biréfringents*, de donner deux rayons réfractés pour un seul rayon incident ; d'où il résulte que, lorsqu'on regarde un objet à travers un cristal biréfringent, on en voit une double image (fig. 486).

Cette propriété s'observe, à des degrés inégaux, dans tous les cristaux qui n'appartiennent point au système cubique. Au contraire, tous les corps cristallisés dans ce dernier système, et toutes les substances amorphes, comme le verre, ne possèdent pas la double réfraction. Cependant ils peuvent l'acquérir accidentellement, soit par la *trempe*, soit par une compression dissymétrique.

Les liquides et les gaz ne sont jamais biréfringents.

De *toutes les substances, celle qui présente* le phénomène de la double réfraction *de la manière la plus apparente* est le spath d'Islande (fig. 486).

474. **Loi de Brewster. — Cristaux à un axe.** — Dans un cristal biréfringent, il y a toujours *une* ou *deux* directions suivant lesquelles on n'observe que la réfrac-

Fig. 486.

tion simple, c'est-à-dire suivant lesquelles on ne voit qu'une seule image des objets. Ces directions s'appellent *axes optiques* du cristal.

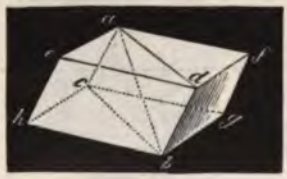


Fig. 487.

On nomme *cristaux à un axe* ceux qui ne présentent qu'une seule direction suivant laquelle la lumière ne se bifurque pas, et *cristaux à deux axes* ceux qui en présentent deux.

Les cristaux à un axe, dont l'emploi est le plus fréquent en optique, sont le *spath d'Islande*, le *quartz* et la *tourmaline*.

Le spath a la forme d'un rhomboèdre dont les faces sont inclinées de 105°,5 (fig. 487). Les faces, au nombre de six, sont des rhombes qui se réunissent, trois par trois, par leurs angles obtus, aux extrémités d'une droite *ab* qui est l'*axe de cristallisation*.

La figure 488 montre un échantillon de quartz ou cristal de roche[1], cristallisé

Fig. 488.

1. *Le quartz* ou *cristal de roche* est de l'acide silicique (ou silice) parfaitement pur et cristallisé.

dans le système rhomboédrique, sous la forme d'un prisme hexagonal à six pans, surmonté de deux pyramides hexagonales. La ligne qui joint les deux sommets des pyramides extrêmes est l'*axe de cristallisation*.

Fig. 489.

Fig. 490.

Brewster a constaté cette loi générale : *Dans les cristaux à un axe, l'axe optique coïncide toujours avec l'axe de cristallisation.*

On nomme *section principale* d'un cristal à un axe tout plan perpendiculaire à une face naturelle ou artificielle du cristal, qui passe par l'axe optique du cristal ou lui est simplement parallèle. La figure 489 montre l'axe optique AA' d'un spath, et plusieurs sections principales, telle que ABA'B'.

Tout rayon lumineux tombant sur le cristal, dans l'une quelconque de ses sections, se bifurque en deux rayons réfractés (fig. 491). Au contraire, tout rayon lumineux qui tomberait normalement sur une face artificielle, telle que ABC (fig. 490), taillée perpendiculairement à l'axe optique NI, ne se bifurquerait pas en se réfractant, car il serait parallèle à l'axe optique du cristal.

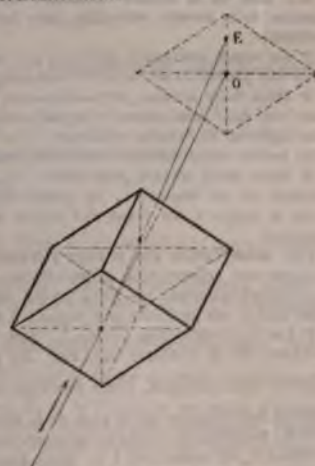


Fig. 491.

475. **Rayon ordinaire et rayon extraordinaire.** — Des deux rayons réfractés auxquels donnent naissance les cristaux à un axe, l'un suit toujours les lois de la réfraction simple, mais l'autre n'est généralement pas soumis à ces lois. Le premier de ces rayons est dit *rayon ordinaire*, et l'autre *rayon extraordinaire*. Les images qui leur correspondent se désignent elles-mêmes sous les noms d'*image ordinaire* et d'*image extraordinaire*.

On peut mettre ce fait en évidence de deux manières :

1° On *fait tomber un rayon lumineux sur* un rhomboèdre de spath, et il en

sort deux, qui vont marquer leurs traces en E et en O sur un écran (fig. 491). Quand on fait tourner le spath autour du rayon incident, l'un des rayons émergents reste immobile : c'est le *rayon ordinaire*; l'autre tourne en même temps que le cristal autour du premier rayon : c'est le *rayon extraordinaire*.

Supposons qu'à un instant donné les deux images se projettent sur une même ligne verticale (fig. 491) : si l'on projette alors la face du rhomboèdre, on voit que la petite diagonale de ce rhombe (ou losange) est aussi verticale. Et si nous tournons le spath de manière à amener les deux images sur une même ligne horizontale, nous retrouvons encore la petite diagonale en coïncidence avec la ligne des images.

Il en est de même dans tous les cas : *la ligne des images est toujours parallèle à la petite diagonale des faces traversées par la lumière*. Ce plan qui passe par les deux petites diagonales des deux faces opposées du cristal est précisément la *section principale* du rhomboèdre. Il mérite donc d'être signalé, puisqu'il contient toujours les deux rayons.

476. **Cristaux positifs et cristaux négatifs.** — Le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire ont des indices différents : dans certains cristaux, c'est l'indice du rayon ordinaire qui est le plus grand; dans d'autres, c'est l'indice du rayon extraordinaire. Fresnel a nommé les premiers *cristaux négatifs*, et les derniers *cristaux positifs*.

Le spath d'Islande, la tourmaline, le saphir, le rubis, l'émeraude, le mica, le prussiate de potasse, le phosphate de chaux, sont *négatifs* ; le quartz, le zircon, la glace, l'apophyllite à un seul axe, sont *positifs*. La classe des cristaux négatifs est beaucoup plus nombreuse que celle des cristaux positifs.

477. **Lois de la double réfraction dans les cristaux à un axe.** — Le phénomène de la double réfraction dans les cristaux à un axe est soumis aux lois suivantes :

1° *Le rayon ordinaire, quel que soit son plan d'incidence, suit toujours les deux lois générales de la réfraction simple.*

2° *Dans toute section perpendiculaire à l'axe, le rayon extraordinaire suit aussi ces deux lois comme le rayon ordinaire, mais avec un indice de réfraction différent de l'indice ordinaire :* d'où la distinction d'un *indice ordinaire* et d'un *indice extraordinaire* pour les cristaux biréfringents.

3° *Dans toute section principale, le rayon extraordinaire ne suit pas la seconde loi de Descartes : les plans d'incidence et de réfraction coïncident, mais le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction n'est pas constant.*

478. **Construction des rayons réfractés : Règle d'Huygens**[1]. — On doit à Huygens une construction géométrique, dite *règle d'Huygens*, qui permet d'obtenir graphiquement les deux rayons réfractés, au moyen du rayon incident, dans toutes ses positions par rapport à l'axe.

1° *Cas de la réfraction simple.* — Soit MM la surface réfringente, SI le rayon incident, IN la normale (fig. 492). Du point I comme centre, décrivons deux sphères concentriques, l'une de rayon égal à l'unité, l'autre à $\frac{1}{n}$. (Ces deux sphères sont coupées par le plan de la figure suivant deux cercles concentriques A et B.) Prolongeons le rayon incident jusqu'à sa rencontre en A avec la sphère de rayon 1, et menons en A le point tangent à la sphère (ce plan tangent est coupé suivant la ligne AT, tangente en A au cercle correspondant). Du point T, menons un plan tangent à la sphère de rayon $\frac{1}{n}$ (il est coupé par le plan de la

1. Nous la donnons telle qu'elle a été simplifiée par le physicien français *Billet*.

figure suivant la ligne TB, tangente au cercle BI. Enfin, joignons le point I au point de contact B : *la ligne* IB *est le rayon réfracté qui correspond au rayon incident* SI.

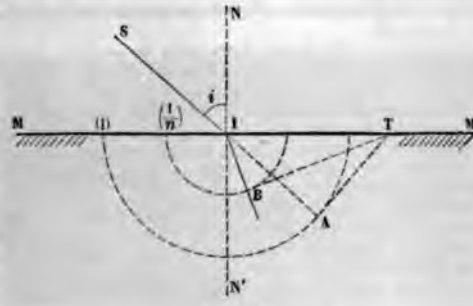


Fig. 492.

En effet, dans le triangle ITB, qui est rectangle en B, l'angle aigu en T est égal à l'angle de réfraction BIN' et l'on a la relation

$$IB\left(\text{ou } \frac{1}{n}\right) = IT \sin BIN'.$$

Dans le triangle IAT, qui est rectangle en A, l'angle aigu en T est égal à l'angle AIN' ou à l'angle i, et l'on a la relation

$$IA \text{ (ou 1)} = IT \sin i.$$

En divisant ces deux équations membre à membre, il vient

$$\frac{\sin BIN'}{\sin i} = n;$$

donc l'angle BIN' est égal à l'angle r, et IB est le rayon réfracté qui correspond au rayon incident SI.

Remarques. — La construction précédente étant rigoureusement plane, on peut énoncer la règle d'Huygens, plus simplement, dans le cas de la réfraction simple :

On décrit du point I *comme centre deux demi-cercles concentriques, l'un de rayon* 1 *et l'autre de rayon* $\frac{1}{n}$. *On prolonge le rayon incident jusqu'à sa rencontre en* A *avec le premier cercle, on mène la tangente au point d'intersection* A, *et du point* T *où cette tangente coupe cette surface réfringente, on mène une tangente au deuxième demi-cercle. Le rayon* IB *mené au point de contact de cette dernière tangente est le rayon cherché.*

2° *Cas général.* — Dans le cas d'un milieu biréfringent, la règle d'Huygens se modifie comme il suit :

Du point I *comme centre on construit d'abord une sphère de rayon* 1, *puis la surface de l'onde lumineuse*[1], *qui correspond au milieu réfringent* : on pro-

1. *On appelle surface de l'onde* le lieu des points où les vibrations lumineuses *du point I sont parvenues* dans le cristal au bout de l'unité de temps.

plus ou moins faible, et le *punctum proximum* est beaucoup plus voisin de l'œil myope que d'un œil emmétrope du même âge. M. Javal appelle *myopie légère* celle où le *punctum remotum* est au delà de 33 centimètres, *myopie moyenne* celle où il est compris entre 33 centimètres et 10 centimètres, et *myopie forte* celle où la distance maximum de la vision distincte est inférieure à 10 centimètres.

L'écran rétinien étant à une distance plus grande de l'appareil dioptrique de l'œil, l'image nette des objets éloignés doit se former en avant de la rétine; tout se passe comme si l'œil avait un excès de pouvoir convergent. On comprend donc qu'on puisse corriger cette infirmité par l'usage de besicles *à verres concaves*, qui diminuent la convergence des faisceaux lumineux pénétrant dans l'œil, et leur permettent d'aller former leurs foyers sur la rétine.

La myopie n'est pas, comme la presbytie, une simple infirmité se développant avec l'âge, d'une manière régulière et pour ainsi dire indépendante de l'usage des besicles. C'est une *maladie de l'œil*, d'autant plus dangereuse qu'elle se développe lentement, sans douleur, et *progressivement* lorsqu'on n'en prend pas soin, jusqu'à ce que l'allongement graduel du globe oculaire et la distension de la rétine qui en résulte, suppriment la perception des images nettes, pour les objets rapprochés aussi bien que pour les objets lointains.

Remarquons en outre que les personnes affectées de myopie légère peuvent devenir presbytes. Il suffit pour cela que leur *punctum proximum* aille rejoindre leur *punctum remotum*, lequel est distant de plus de 33 centimètres. Cela peut arriver naturellement, avec les années, par suite d'une diminution graduelle dans le parcours de l'accommodation. Dans ce cas, la vision nette des objets très rapprochés ne pourra être obtenue qu'à l'aide de verres convexes.

468. **Hypermétropie.** — C'est une infirmité causée par une déformation anatomique exactement opposée à celle qui constitue la myopie : l'*œil hypermétrope* est plus court que l'*œil emmétrope*. Il en résulte une réduction du parcours d'accommodation, non pour les points éloignés de l'œil comme dans la myopie, mais pour les points voisins : le *punctum proximum* se trouve plus ou moins reculé, suivant le degré de l'hypermétropie. La vision des objets éloignés reste donc parfaitement nette, de sorte que l'infirmité peut passer inaperçue lorsqu'elle est faible. Les personnes *légèrement* hypermétropes en sont quittes pour devenir presbytes *un peu plus tôt* que les emmétropes et pour faire usage de verres *convexes un peu* plus forts que les verres suffisants pour les em-

métropes du même âge. L'hypermétropie, plus ou moins forte, est d'ailleurs parfaitement corrigée par l'usage des verres convexes, car ceux-ci, en rendant plus convergents les rayons lumineux émanés des objets voisins, leur permettent d'aller faire leur image sur l'écran rétinien.

Les hypermétropes âgés, surtout si leur hypermétropie est forte, trouvent grand avantage à porter des verres convexes pour voir au loin.

469. **Astigmatisme.** — C'est le défaut de l'œil à la fois le plus fréquent et le moins connu. Chez toutes les personnes dont la vue est mauvaise et délicate, chez tous les myopes qui ne voient pas parfaitement bien au loin, malgré le secours des verres concaves, chez les presbytes qui ne parviennent pas à trouver des besicles convexes leur permettant de lire sans fatigue, il y a lieu de suspecter l'existence de l'*astigmatisme*[1]. Il faut encore le rechercher chez les personnes affectées de strabisme ou même d'une simple inégalité de force dans les deux yeux. Ce défaut se traduit encore bien souvent par du larmoiement, ou par des inflammations de la paupière ou de la conjonctive, qui sont rebelles à toute espèce de traitement.

La cause anatomique de l'astigmatisme est une *difformité du globe oculaire* les milieux réfringents de l'œil *astigmate*, au lieu d'être des solides de révolution autour de son axe antéro-postérieur, sont assimilables à des fragments d'ellipsoïdes à axes inégaux.

La conséquence physiologique est la suivante. Supposons, par exemple, qu'un œil emmétrope subisse un léger aplatissement, de telle sorte que son diamètre vertical devienne plus petit que son diamètre horizontal : l'œil deviendra myope dans le méridien vertical, tout en restant emmétrope dans le méridien horizontal; il verra donc parfaitement les lignes verticales éloignées, tandis que les lignes horizontales lui paraîtront moins nettes. Ce caractère de l'astigmatisme n'est pas absolu. Il peut arriver que le défaut soit assez fort chez certaines personnes pour affaiblir notablement la vue, sans qu'elles se soient jamais aperçues de l'inégale netteté des lignes horizontales et des lignes verticales. M. Javal a démontré récemment que chez les jeunes gens le cristallin peut se déformer spontanément *de manière à compenser l'astigmatisme de la cornée*. Cette découverte explique pourquoi l'astigmatisme passe si souvent inaperçu, tout en étant une cause de fatigue considérable.

Besicles cylindriques. — Ophthalmomètre de Javal et Schiötz. — Il est évident qu'on ne peut remédier à cette infirmité avec des verres sphériques, les seuls que vendent ordinairement les opticiens, mais avec des verres qui agissent inégalement dans les différents méridiens de l'œil. L'astigmatisme, découvert par Thomas Young, a été corrigé pour la première fois par l'astronome Airy, au moyen de *verres cylindriques*.

Le docteur Javal a démontré que, si l'on assimile l'œil à un ellipsoïde à trois axes inégaux, tout verre cylindrique capable de ramener à l'égalité de réfringence les deux arcs situés dans le plan perpendiculaire à l'axe antéro-postérieur ramène en même temps tous les autres méridiens de l'œil au même pouvoir réfringent. La correction de l'astigmatisme se fera donc par l'emploi d'un *verre cylindrique approprié*. Ce problème est résolu avec précision et rapidité, du moins dans le cas de l'astigmatisme cornéen, à l'aide d'un ophtalmomètre inventé en 1881 par MM. Javal et Schiötz.

470. **Diplopie.** — La *diplopie* est une affection de l'œil qui fait qu'on voit les

1. Dr Javal, *Des maladies de l'œil.*

tableau, uniformément éclairé en rouge (fig. 494). Ce beau phénomène constitue les *franges de Fresnel*. Elles sont distribuées *symétriquement*, dans le champ éclairé, par rapport à l'une d'elles *cc*, plus brillante que les autres, et qu'on appelle la *frange centrale*.

Lorsqu'on opère avec de la lumière blanche, les franges obtenues sont encore plus belles. Elles consistent alors en des bandes *irisées*, c'est-à-dire formées des couleurs du spectre, plus ou moins superposées : le violet est placé le plus près de la frange centrale, laquelle reste brillante et absolument blanche.

481. Explication des franges de Fresnel. — Confirmation de l'hypothèse des ondulations. — 1° *Cas de la lumière monochromatique.* — A chacune des sources lumineuses *s* et *s'* (fig. 493) correspond un système d'ondes analogues à celles de la figure 313. En tous les points où ces deux systèmes d'ondes se couperont avec une différence de marche constante, il se produira des interférences. Les points a, a' (fig. 493), qui sont à égale distance des deux centres, reçoivent des mouvements de même sens et qui s'ajoutent : c'est le lieu de la *frange centrale*. Ce lieu est constitué dans l'espace par un plan vertical dont la trace est AO

Fig. 494.

sur le plan de la figure 493. Si l'on coupe ce plan par un écran vertical et perpendiculaire à la droite AO, on aura à toute distance du point O une ligne verticale brillante, qui constituera la frange centrale de la figure 494.

A droite et à gauche de ce plan central, les ondes se croisent avec des différences de marche croissantes. Pour tous les points (tels que $b, b'..., c, c'$) où la différence de marche sera d'un *nombre pair* de demi-longueurs d'onde, il y aura addition de mouvement et par suite maximum de lumière, comme dans le plan central : ces points constitueront les *franges latérales brillantes*; pour tous les points (tels que $m, m'..., n, n'$) où la différence de marche sera d'un *nombre impair* de demi-longueurs d'onde, il y aura destruction de mouvement et par suite minimum de lumière : ces points constitueront les *franges latérales sombres*.

Toutes ces franges latérales sont, dans l'espace, des hyperboloïdes de révolution, dont les intersections par le plan de l'écran sont des portions d'hyperboles, qui sur une faible étendue paraissent rectilignes (fig. 494).

2° *Cas de la lumière blanche.* — Nous avons choisi la lumière rouge, parce que c'est la lumière simple qui donne les franges les plus larges. En effet, en répétant l'expérience avec les autres lumières simples du spectre, on obtient des franges de plus en plus étroites à mesure que les couleurs employées sont de plus en plus réfrangibles. La figure 495 montre les largeurs relatives des franges obtenues successivement avec le rouge, le vert et le violet du spectre

(pour une même différence de marche, la largeur est égale à un même nombre de demi-longueurs d'onde).

En même temps que ces franges sont plus ou moins larges, elles sont plus ou moins éloignées de la frange centrale : la première frange rouge, par exemple, est la plus éloignée du centre, tandis que la première frange violette est la moins éloignée. En appelant x la distance d'une frange latérale d'ordre n à la frange centrale, y la distance de l'écran au point O, c la distance des deux sources virtuelles s et s', et λ la longueur d'onde de la couleur considérée, on a $x = \frac{ny}{4c}\lambda$. Par conséquent, lorsqu'on emploie la lumière blanche, les franges du *même ordre* (c'est-à-dire correspondant à la même différence de marche) pour les diverses couleurs se superposent en se recouvrant imparfaitement : leur ensemble doit donc former une espèce de spectre confus, qui se réduit à une bande plus ou moins irisée sur les bords et dans lequel les couleurs sont placées dans un ordre inverse de celui du spectre solaire par rapport à la frange centrale blanche.

Fig. 495.

482. Nécessité de l'existence de l'éther. — La conclusion nécessaire de l'expérience de Fresnel, c'est que la lumière *vibre*, ou qu'elle est le résultat d'un *mouvement vibratoire*, puisqu'elle interfère. Mais quelle est la substance qui vibre dans un rayon lumineux? *Cela ne peut pas être l'air*, comme dans un *rayon sonore*, car la lumière n'a pas besoin d'air, ni pour se produire, ni pour se propager. *Il faut donc admettre l'existence* d'un nouveau milieu élastique, autre que l'air, qui se trouve partout où la lumière se propage, non seulement dans les espaces célestes, mais dans le vide apparent de nos machines pneumatiques, ainsi que dans l'air lumineux et dans les corps transparents qui transmettent la lumière, et même dans les corps opaques qui ne réfléchissent la lumière qu'en la modifiant plus ou moins. Ce fluide universel, qui pénètre et imbibe tout ce qui existe dans l'univers, c'est l'*éther*. Et de même que le son est le résultat d'un certain mouvement vibratoire de l'air, la *lumière* est le résultat d'un certain mouvement vibratoire de l'éther.

483. Origine des couleurs du spectre. — La lumière est donc à l'éther ce que le son est à l'air ; la lumière est en quelque sorte le *son* de l'éther[1]. On peut pousser plus loin l'assimilation, en ajoutant que les diverses couleurs du spectre sont les *notes* de la lumière. Cela veut dire qu'elles sont dues à des vibrations

1. A. Bertin, *Conférence sur la Polarisation de la lumière* (Revue scientifique, janvier 1867).

plus ou moins rapides de l'éther, et par suite à des longueurs d'onde plus ou moins grandes. La formule $x = \frac{ny}{4c}\lambda$ a permis de mesurer λ pour les différentes couleurs du spectre. On a trouvé ainsi que les longueurs d'onde du *violet* et du *rouge* sont entre elles comme 2 est à 3. Par suite, en appelant N_v et N_r les nombres de vibrations correspondants à ces deux couleurs, comme on a, par définition,

$$\lambda_v = \frac{V}{N_v} \quad \text{et} \quad \lambda_r = \frac{V}{N_r}, \quad \text{d'où} \quad \frac{N_v}{N_r} = \frac{\lambda_r}{\lambda_v},$$

il en résulte que le rapport des nombres de vibrations $\frac{N_v}{N_r}$ est égal à $\frac{3}{2}$. Il y a donc entre ces deux couleurs le même intervalle qu'entre les notes *sol* et *ut* de la gamme naturelle, c'est-à-dire une *quinte*.

On voit que la couleur *monte* du rouge au violet, comme le son monte de l'*ut* au *sol*, mais elle ne monte que d'une *quinte*. La gamme complète des couleurs ne comprend donc pas une octave entière, comme la gamme naturelle, mais seulement une quinte.

484. **Valeurs numériques des longueurs d'onde et des vibrations lumineuses.** — L'unité avec laquelle sont évaluées les longueurs d'ondes lumineuses est habituellement le *millionième de mètre*, ou *micron*. Le nombre de vibrations de chaque couleur se déduit de sa longueur d'onde par la relation $N = \frac{V}{\lambda}$, V étant la vitesse de la lumière (77 000 lieues par seconde ou 308 millions de mètres). Voici les nombres qu'on obtient ainsi pour les principales couleurs du spectre.

COULEURS	LONGUEURS D'ONDE (en *microns*)	NOMBRE DE VIBRATIONS (par seconde en quatrillions)
Violet	0,423	709
Indigo	0,449	668
Indigo-bleu	0,459	654
Bleu	0,475	631
Vert	0,512	586
Jaune	0,551	544
Rouge	0,620	484

On voit que la valeur moyenne d'une longueur d'onde lumineuse ne dépasse pas *la moitié d'un millionième de mètre*, et que le nombre moyen des vibrations dépasse 600 *mille milliards par seconde*.

485. **Autres phénomènes d'interférence : Anneaux de Newton.** — 1° *Production du phénomène.* — Tous les corps diaphanes, solides, liquides ou gazeux, lorsqu'ils sont réduits en lames suffisamment minces, paraissent colorés de nuances extrêmement vives, surtout par réflexion. Tels sont les cristaux qui se clivent en feuilles très minces, comme le mica, le gypse, la nacre; il en est de même du verre soufflé en boule très mince. Une goutte d'huile étalée rapidement sur une grande masse d'eau présente toutes les nuances du spectre dans un ordre constant. Une bulle de savon paraît blanche d'abord; mais à mesure qu'on l'enfle, on voit apparaître de brillantes teintes irisées, surtout à la partie supérieure, où l'enveloppe liquide qui forme la bulle est plus mince.

Ces couleurs se disposent en zones concentriques horizontales autour du sommet : c'est ce qu'on appelle des *anneaux colorés*. Le sommet devient noir au moment où il n'a plus l'épaisseur suffisante pour réfléchir la lumière, et la bulle crève alors subitement.

2° *Expériences de Newton.* — Newton le premier étudia le phénomène des anneaux colorés. Voulant constater la relation qui existe entre l'épaisseur de la lame mince, la couleur des anneaux et leur étendue, il produisait ceux-ci au moyen d'une couche d'air interposée entre deux verres, l'un plan, l'autre convexe et à très long foyer (fig. 496). Les deux surfaces étant exposées devant une fenêtre, à la lumière du jour, de manière à les voir par réflexion, on aperçoit au point de contact une tache noire entourée d'anneaux colorés, au nombre de six ou sept, dont les teintes s'affaiblissent graduellement (fig. 497). Si les verres sont vus par transmission, le centre des anneaux est blanc, et leurs couleurs sont complémentaires de celles des anneaux par réflexion.

Fig. 496.

Fig. 497.

Avec une lumière homogène, la couleur rouge par exemple, les anneaux sont successivement noirs et rouges; ils ont un diamètre d'autant moindre que la couleur est plus réfrangible. Avec de la lumière blanche, les anneaux sont colorés des différentes couleurs du spectre, ce qui provient de ce que les anneaux des différentes couleurs simples, ayant des diamètres différents, ne se superposent pas, mais se séparent plus ou moins.

Si la distance focale de la lentille est de 3 à 4 mètres, les anneaux peuvent s'observer à l'œil nu; mais si le foyer est plus rapproché, il faut regarder les anneaux avec une loupe.

3° *Théorie.* — La coloration des lames minces et des anneaux de Newton est un phénomène d'interférence lumineuse, qui correspond au phénomène des tuyaux sonores en acoustique. Il résulte, en effet, de ce que les rayons qui se sont réfléchis sur la seconde surface de la lame interfèrent avec ceux que la première surface a réfléchis. Quant aux anneaux vus par réfraction, ils proviennent de l'interférence des rayons transmis directement avec les rayons qui ne sont transmis qu'après deux réflexions intérieures sur les faces de la lame.

4° *Application à la photographie des couleurs.* — M. G. Lippmann a fait récemment une remarquable application de ce phénomène à la solution du problème de la photographie des couleurs. Nous expliquerons ci-dessous (525) le procédé de M. Lippmann.

486. **Autres phénomènes d'interférence : Diffraction et réseaux.** — De même qu'en ajoutant de la lumière à de la lumière on peut produire l'obscurité, de même, en *retranchant de la lumière* en certains points de l'espace, on peut *augmenter l'éclat* de ces points; il suffira, pour cela, que les rayons retranchés soient précisément ceux qui pourraient interférer avec les rayons que l'on conserve. C'est ce qui arrive dans les phénomènes de *diffraction* et des *réseaux*, que nous allons décrire sommairement.

Diffraction. — La *diffraction* est une modification que subit la lumière quand elle rase le contour d'un corps, *ou quand* elle traverse une petite ouverture, modification *en vertu de laquelle* les rayons lumineux paraissent s'infléchir et *pénétrer dans l'ombre.*

Réseaux. — On nomme *réseau*, en optique, une suite de raies, alternativement opaques et transparentes, très rapprochées les unes des autres. Tels sont les traits parallèles qu'on grave au diamant, sur verre, pour former les micromètres. Les traits sont, dans ce cas, la partie opaque du réseau.

Si l'on fait passer la lumière à travers un réseau de ce genre, contenant par exemple 100 traits par millimètre, voici le curieux effet qu'on observe. En l'absence du réseau, la lumière ne sortirait pas du champ de l'ouverture par où elle entre dans la chambre obscure; mais avec le réseau on voit des maxima de diverses couleurs formant une série de spectres sur une ligne perpendiculaire aux traits du réseau.

C'est un phénomène analogue à celui qu'on voit, sans aucun appareil, lorsqu'on regarde un bec de gaz à travers les interstices que laissent entre eux les doigts de la main, ou bien à travers les cils des paupières.

Avec des *réseaux croisés*, les spectres se répandent non seulement sur une ligne, mais dans toutes les directions. Ce genre d'interférences fournit ainsi l'un des plus beaux phénomènes de l'optique physique.

Enfin, si les mailles du réseau forment des *cercles concentriques*, les spectres s'étalent sur des anneaux. C'est un phénomène analogue aux couronnes qu'on voit autour de la lune par un temps brumeux, ou autour des becs de gaz par le brouillard.

POLARISATION.

487. Définition expérimentale de la polarisation. — I. *Expérience de Bartholin.* — Quand on fait tomber un faisceau lumineux sur un rhomboèdre de spath, il en sort deux faisceaux : l'un, que nous avons appelé faisceau ordinaire, et l'autre, le faisceau extraordinaire, qui a la propriété de tourner autour du premier quand on fait tourner le rhomboèdre autour du faisceau incident. Si l'on reçoit ces faisceaux sur un même écran, chacun d'eux y trace une image de l'ouverture : au faisceau ordinaire correspond une *image ordinaire*, et à l'autre une *image extraordinaire*. Ces images ont le caractère constant d'être toujours, et dans toutes leurs positions, *égales* en intensité. Et si l'on dispose l'expérience de manière que ces deux images se superposent partiellement, on constate que l'éclat de la région commune est double de celui des parties distinctes (fig. 498).

Fig. 498.

II. *Expérience d'Huygens.* — *Rhomboèdres croisés* et *Nicols croisés.* — En *1678, Huygens* compliqua d'une manière fort heureuse l'expérience de Bartholin[1]. Ayant dédoublé un faisceau lumineux incident en lui faisant traverser

1. A. Bertin, *loc. cit.*

un premier rhomboèdre de spath, il reçut les deux faisceaux émergents sur un deuxième spath identique au premier et orienté par rapport à celui-ci d'une manière quelconque ; il obtint un nouveau dédoublement de chaque faisceau : ce qui faisait en tout *quatre* faisceaux et *quatre* images. Jusque-là il n'y avait rien de nouveau : il était naturel que le deuxième spath agît sur la lumière tout comme le premier et la réfractât doublement. Mais, ayant laissé l'un des spaths immobile et fait tourner l'autre autour du faisceau incident, il produisit des phénomènes tout nouveaux.

On peut réaliser l'expérience d'Huygens en en simplifiant le dispositif. Pour cela, au lieu de se servir de rhomboèdres naturels de spath, on prend deux cristaux de spath, taillés artificiellement et modifiés de manière à n'être plus *biréfringents*. C'est ce qu'on appelle des *prismes de Nicol*, ou tout simplement des *nicols*, du nom de l'inventeur[1]. En réalité, le cristal ne perd pas sa propriété biréfringente; mais le rayon réfracté extraordinairement émerge seul, tandis que le rayon ordinaire subit une réflexion intérieure. Les faces traversées par la lumière sont d'ailleurs deux faces naturelles du spath (fig. 501) ; ce sont donc deux rhombes, où il est facile de distinguer les deux petites diagonales qui définissent la section principale du cristal.

Fig. 501.

Si l'on met un premier nicol sur le trajet de la lumière, on n'obtient donc qu'un seul rayon réfracté, et si l'on fait tourner le nicol autour du rayon incident, la lumière passe toujours avec facilité, elle n'a perdu ni son intensité, ni sa couleur : tout se passe comme si elle avait traversé une simple lame de verre. Mais recevons ce rayon émergent sur un deuxième nicol, semblable au premier. Si nous le tournons d'abord de manière que les sections principales

1. Pour construire un *nicol*, on prend un rhomboèdre de spath d'Islande de 20 à 30 millimètres de hauteur environ, sur 8 à 9 de largeur, et on le coupe en deux suivant un plan perpendiculaire au plan des grandes diagonales des bases et passant par les sommets obtus les plus rapprochés l'un de l'autre, puis on recolle les deux moitiés avec la même orientation avec du baume de Canada. Le parallélépipède ainsi construit constitue le prisme de Nicol (fig. 499).

Fig. 499.

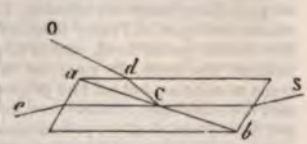


Fig. 500.

L'indice de réfraction du baume de Canada étant plus petit que l'indice ordinaire du spath d'Islande, mais plus grand que son indice extraordinaire, il en résulte que lorsqu'un faisceau lumineux SC (fig. 500) pénètre dans le prisme, le *rayon ordinaire éprouve sur la surface ab* la réflexion totale, et prend la direction *CdO, tandis que le rayon extraordinaire Ce* passe seul.

soient parallèles, nous ne voyons rien de particulier, la lumière traverse le deuxième cristal comme le premier; mais si nous croisons les sections principales (fig. 502), il n'y a plus de rayon émergent, la lumière est *éteinte* : le deuxième nicol, qui tout à l'heure était *transparent* comme du verre, semble être devenu *opaque* comme du plomb.

IV. *Interprétation de ces expériences.* — Interprétons l'expérience d'Huygens. La lumière naturelle, c'est-à-dire celle qui nous vient directement du soleil, traverse tous les nicols, quelle qu'en soit l'orientation; mais la lumière qui

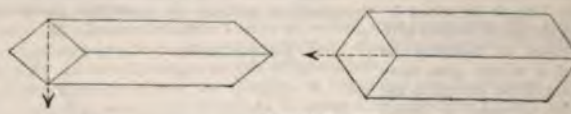


Fig. 502.

traversé un premier nicol ne peut plus en traverser un deuxième *quand leurs sections principales sont croisées* : cette lumière n'est donc plus la lumière *naturelle*; son passage à travers le premier nicol lui a donné des propriétés nouvelles, entre autres celle de ne pouvoir plus traverser le deuxième nicol. On exprime ce fait en disant que *cette lumière est polarisée*, et ce phénomène nouveau constitue la *polarisation de la lumière*. On peut donc définir la polarisation, au point de vue expérimental, de la manière suivante : *Un rayon polarisé est un rayon qui a traversé un premier nicol : il est entièrement éteint par un deuxième nicol orienté à angle droit avec le premier.*

488. **Cause de la polarisation : Vibrations transversales de l'éther.** — Si la rotation du premier nicol autour du rayon incident ne produit aucun effet quelle que soit l'orientation de la section principale du cristal, c'est évidemment que le rayon incident ou rayon naturel est identique à lui-même sur toute sa périphérie. Mais il n'en est plus de même du rayon polarisé, puisque, pouvant passer dans un deuxième nicol orienté *parallèlement* au premier, il est éteint par un deuxième nicol orienté *perpendiculairement* au premier. Tout n'est donc pas égal sur le contour de ce rayon polarisé : le côté horizontal est tout à fait différent du côté vertical [1].

Il faut conclure de là que la vibration lumineuse ne peut pas être longitudinale, c'est-à-dire dirigée suivant le rayon lui-même, car alors ce rayon serait identique à lui-même sur tout son contour. Cette vibration ne peut pas non plus être *oblique* au rayon lumineux, car, si elle était oblique, elle pourrait nécessairement se décomposer en deux vibrations composantes (d'après la règle du *parallélogramme des vitesses*); l'une, *transversale*, resterait donc perpendiculaire au rayon, et l'autre *longitudinale*. Or cette dernière ne pourrait jamais être éteinte par un nicol, puisqu'elle serait identique à elle-même sur tout son contour. Par suite, la vibration lumineuse, ne pouvant être ni parallèle au rayon ni oblique, doit lui être *perpendiculaire* : donc les *vibrations lumineuses* sont des *vibrations transversales*, tout comme les vibrations des ondes aqueuses que nous avons étudiées précédemment en acoustique (324).

On est donc forcé d'admettre, comme une conséquence rigoureuse de l'expérience, que *la lumière est le résultat des vibrations transversales de l'éther.* Dans la lumière naturelle, les vibrations transversales s'effectuent dans toutes les directions à la fois autour du rayon; dans la lumière qui a traversé un *nicol ou un cristal* biréfringent, les vibrations transversales ont été orientées *dans une seule et* même direction : c'est pourquoi l'on dit que le rayon est *polarisé*.

1. *A. Bertin, loc. cit.*

Or, supposons qu'un rayon polarisé perce le plan du tableau au point C, et soit CP la trace de son plan d'incidence (fig. 503). Le rayon étant polarisé, sa vibration est nécessairement située dans le plan du tableau. Elle pourrait d'ailleurs être orientée dans un azimut quelconque, autour du point C : mais nous admettrons, avec Fresnel, qu'elle est orientée suivant CVS, c'est-à-dire dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence. On exprime ce fait en disant que le rayon lumineux *est polarisé dans le plan* CP.

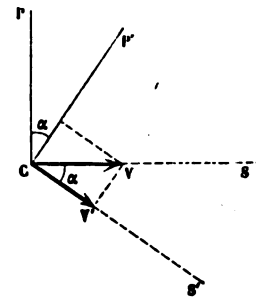


Fig. 503.

489. **Loi de Malus.** — Le plan CS est celui de la section principale du premier nicol : donc la vibration du rayon extraordinaire est elle même dans ce plan : représentons-la par la longueur CV, que nous prenons égale à la valeur maximum de la vitesse.

Supposons qu'en C le rayon lumineux tombe sur un deuxième nicol, dont la section principale CS' soit orientée d'une manière quelconque et fasse un angle α avec la section principale CS du premier nicol. Le rayon qui sortira du deuxième nicol vibrera de même dans le plan CS' et aura le plan CP' pour nouveau plan de polarisation.

Le physicien Malus a démontré que *la vitesse maximum* CV' *de la nouvelle vibration se déduit de la vitesse maximum initiale* CV *par la règle du parallélogramme des vitesses.*

CV' étant la composante de CV, on a entre ces deux quantités la relation

$$[1] \qquad CV' = CV \cos \alpha.$$

Comme, d'autre part, on démontre que *l'intensité* I *d'un rayon lumineux est proportionnelle au carré de sa vitesse maximum*, il en résulte que l'intensité I' du nouveau rayon polarisé est liée à l'intensité initiale I par la relation

$$[2] \qquad I' = I \cos^2 \alpha.$$

L'une quelconque des relations [1] et [2] exprime ce qu'on appelle la *loi de Malus.*

490. **Conséquences de la loi de Malus. — Vérification expérimentale.** — La première conséquence de la loi de Malus, c'est le phénomène qui nous a servi pour définir la polarisation. On voit que si $\alpha = 90°$, c'est-à-dire que si la section principale du deuxième nicol est perpendiculaire à la section principale du premier nicol, on a $I' = 0$, c'est-à-dire que l'intensité du rayon lumineux est réduite à zéro : il est *éteint* par le deuxième nicol. Cette conséquence a été vérifiée ci-dessus par l'expérience des nicols croisés.

Au contraire, si $\alpha = 0$, $I' = I$, c'est-à-dire que l'intensité du rayon polarisé n'est pas diminuée par son passage à travers le deuxième nicol. C'est ce que nous avions vu précédemment, en orientant la section principale du deuxième nicol parallèlement à celle du premier.

Enfin, si α a une valeur quelconque, comprise entre 0 et 90°, le rapport $\left(\frac{I'}{I}\right)$ a une valeur comprise entre 0 et 1, c'est-à-dire que l'intensité I' du rayon transmis par le deuxième nicol est toujours plus faible que l'intensité du rayon polarisé *par le premier nicol; et* quand l'inclinaison du deuxième nicol sur *le premier varie depuis 0° jusqu'à 90°*, l'affaiblissement de l'image transmise *s'accentue de plus en plus, jusqu'à* atteindre l'extinction complète.

Expériences. — On peut montrer aisément cette variation continue d'intensité en *analysant*, comme on dit, c'est-à-dire en faisant passer par un nicol, les deux faisceaux lumineux qui sont transmis par un rhomboèdre de spath dans

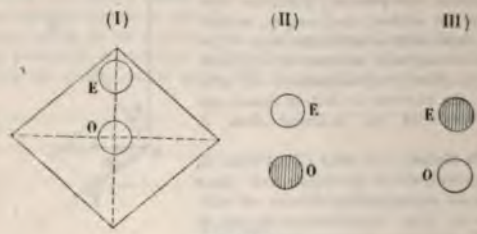


Fig. 504.

l'expérience de Bartholin. Faisons d'abord tourner le rhomboèdre autour du faisceau incident de manière à distinguer les deux images : on voit l'image ordinaire qui reste immobile, et l'image extraordinaire qui vient se placer au-dessus de la première, dans le même plan vertical (fig 504, I) : la petite diagonale du rhomboèdre est alors verticale, et il en est de même de la section principale du cristal. Analysons maintenant ces deux images avec un nicol. Pour éteindre l'*image ordinaire*, nous devons amener la grande diagonale du nicol à être horizontale, comme celle du spath (fig. 504, II); pour éteindre l'*image extraordinaire*, il faut tourner le nicol de manière que sa grande diagonale devienne verticale, comme la petite diagonale du spath (fig. 504, III). Enfin, dans les positions intermédiaires du nicol, les deux images sont visibles, mais à des degrés d'intensité différents. La figure 505 représente, étalées sur un double cercle, les deux images à leurs divers degrés d'affaiblissement.

Fig. 505.

491. Divers procédés de polarisation de la lumière. — Cette modification de la lumière peut être réalisée de différentes manières.

I. *Polarisation par double réfraction.* — Le procédé le plus ancien est la *double réfraction*. Nous avons vu dans l'expérience précédente que les deux faisceaux qui sortent d'un spath peuvent être tour à tour *éteints* par un nicol. *Ils sont polarisés* l'un et l'autre et à angle droit : le *faisceau ordinaire* dans le *plan de la section principale du nicol* (ou dans le plan de la section *principale du spath*, et le *faisceau extraordinaire* dans un plan perpendiculaire à *la section principale*.

II. *Polarisation par réflexion.* — 1° *Expérience de Malus.* — Un jour le physicien français Malus[1], observant, de sa maison, la lumière réfléchie sur les vitres du palais du Luxembourg, s'aperçut qu'elle pouvait être éteinte avec un spath, et que par conséquent elle était polarisée.

Voici comment on peut répéter cette expérience. On envoie un faisceau de lumière naturelle sur une glace verticale, de manière à le réfléchir horizontalement, sous une incidence convenable. Si l'on reçoit le faisceau réfléchi sur un nicol, on peut l'éteindre complètement pour une orientation convenable du nicol : *donc le rayon réfléchi est polarisé.* Au moment de l'extinction, on remarque que la grande diagonale du nicol est *verticale* : donc la vibration du rayon réfléchi est également verticale, c'est-à-dire perpendiculaire au plan de réflexion, lequel est horizontal. Donc le rayon réfléchi est polarisé dans le plan de réflexion (ou d'incidence).

2° *Angle de polarisation.* — La réflexion, comme la double réfraction, opère donc une sorte de triage des vibrations lumineuses. Ce triage est d'autant plus parfait, et la polarisation qui en résulte est d'autant plus complète, que l'angle de réflexion est plus convenable.

L'angle pour lequel la polarisation est maximum s'appelle l'*angle de polarisation.* Il est de 34°25′ à la surface du verre.

3° *Loi de Brewster.* — Tous les corps peuvent, comme le verre, polariser la

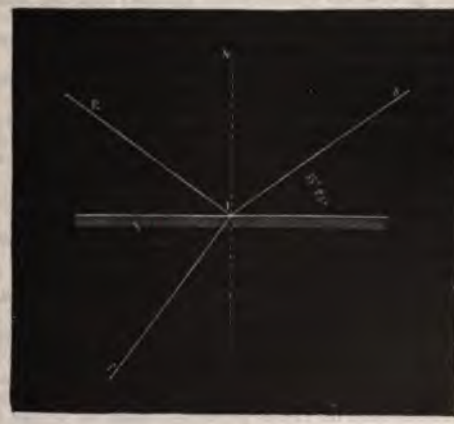


Fig. 506.

lumière par réflexion, mais plus ou moins complètement et sous des angles de polarisation très divers.

Le *marbre noir*, par exemple, polarise complètement la lumière, tandis que le *diamant*, le *verre ordinaire*, le *verre d'antimoine*, ne la polarisent que partiellement. De tous les corps, ce sont les métaux qui ont le plus faible pouvoir polarisant.

Quant aux angles de polarisation, ils varient avec les diverses substances, d'après la loi suivante, due à Brewster :

1. *Malus était professeur à l'École* polytechnique de Paris.

L'angle de polarisation est l'angle d'incidence pour lequel le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté.

Ainsi, lorsqu'un rayon lumineux SI (fig. 506) tombe sur une glace de verre sous l'*angle de polarisation* (33° 25'), il se partage en deux rayons, l'un IR qui est réfléchi dans l'air sous un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence, et l'autre Ir qui est réfracté dans le verre, perpendiculairement au rayon IR.

III. *Polarisation par réfraction simple.* — Dans la réfraction simple, le rayon réfracté se trouve également polarisé, mais dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence. Donc les deux rayons, réfléchi et réfracté, qui correspondent au rayon incident unique, sont polarisés dans des plans rectangulaires.

IV. *Conclusion.* — Ainsi toutes (ou presque toutes) les modifications que subit la lumière naturelle (réflexion, réfraction simple et double réfraction), la polarisent plus ou moins complètement. Et comme, à la surface de la terre, on reçoit bien peu de lumière qui n'ait plus ou moins subi l'une de ces modifications, il en résulte qu'il est difficile non pas d'avoir *de la lumière polarisée*, mais d'avoir de la lumière *qui ne soit pas polarisée partiellement.*

Lumière naturelle. — Il résulte en outre de ces divers procédés de polarisation qu'on peut considérer un faisceau de lumière naturelle comme formé de deux *faisceaux d'égale intensité, polarisés à angle droit.*

492. Interférence des rayons polarisés. — Après la découverte de la polarisation, Arago et Fresnel cherchèrent si les rayons polarisés présentaient entre eux les mêmes phénomènes d'interférence que les rayons non polarisés. Leurs expériences les conduisirent aux deux lois suivantes :

1re Loi. — *Deux rayons polarisés dans le même plan interfèrent entre eux absolument comme deux rayons naturels.*

2e Loi. — *Deux rayons polarisés dans deux plans perpendiculaires n'interfèrent pas dans le cas où interféreraient deux rayons naturels* [1].

493. Appareils de polarisation. — Toutes les expériences de polarisation s'effectuent aisément à l'aide d'instruments spéciaux, dits *appareils de polarisation.* Ces appareils, quoique très différents de forme, se réduisent tous à deux organes essentiels :

1° Le *polariseur*, pièce qui reçoit la lumière incidente naturelle, et qui la polarise par l'un des procédés ci-dessus étudiés;

2° Le *polariscope* ou *analyseur*, pièce qui reçoit la lumière polarisée et qui sert à l'*analyser*, c'est-à-dire à reconnaître si elle est polarisée et à en déterminer le plan de polarisation.

La pièce qui sert d'*analyseur* peut d'ailleurs être la même que celle qui sert de *polariseur.* Ce sera tantôt une *glace noire* ou un nicol, si l'on veut n'avoir qu'une seule image; tantôt un rhomboèdre de spath, si l'on veut avoir deux images.

Entre le polariseur et l'analyseur se placent les substances que l'on veut observer dans la lumière polarisée. Cette observation peut se faire de deux manières : tantôt on rend les rayons parallèles, tantôt on les fait converger à l'aide d'une lentille. Dans le premier cas, on dit qu'on observe dans la *lumière polarisée parallèle*, et dans le deuxième cas on observe dans la *lumière polarisée convergente*.

Les appareils de polarisation les plus connus sont :

1° L'appareil primitif de Malus, perfectionné par Biot, qu'on appelle quelquefois le *polariscope de Biot.*

2° L'*appareil de Norremberg.*

3° Les divers *saccharimètres*, dont le type est le *saccharimètre de Biot.*

1. On déduit de ces lois l'explication des brillants phénomènes de coloration dans les lames minces qui constituent la polarisation chromatique proprement dite.

494 **Appareil de Norremberg.** — Norremberg a transformé l'appareil primitif et incommode de Biot en un appareil simple et peu dispendieux.

Description. — Il se compose de deux colonnes de cuivre *b* et *d* (fig. 507), qui soutiennent une glace non étamée *n*, mobile autour d'un axe horizontal. Un petit cercle gradué *c* indique l'angle de cette glace avec la verticale. Entre les pieds des deux colonnes est une glace étamée *p*, fixe et horizontale. A leur extrémité supérieure, ces mêmes colonnes supportent un limbe gradué, dans lequel peut tourner un disque *o*. Celui-ci, au centre duquel est une ouverture quadrangulaire, porte une glace de verre noir *m*, faisant avec la verticale un angle égal à l'angle de polarisation. Enfin, un disque annulaire gradué *k* peut se fixer, par une vis de pression, à différentes hauteurs sur les colonnes. Un deuxième anneau *a*, soutenu par le premier, peut prendre autour d'un axe horizontal différentes inclinaisons, et porte un diaphragme *e*, percé à son centre d'une ouverture circulaire.

Fig. 507.

Fonctionnement. — La glace *n* faisant avec la verticale un angle de 35°25', c'est-à-dire égal à l'angle de polarisation du verre, les rayons S*n* qui rencontrent cette glace sous cet angle se polarisent en se réfléchissant dans la direction *np*, vers la glace *p*, qui les renvoie dans la direction *pnr*. Après avoir traversé la glace *n*, le faisceau polarisé tombe sur la glace noire *m* sous un angle de 35°25', puisque cette glace fait précisément le même angle avec la verticale. Or, si l'on fait tourner horizontalement le disque *o* auquel est fixée la glace *m*, celle-ci se déplace en conservant toujours la même inclinaison et l'on remarque deux positions où elle ne réfléchit pas le faisceau incident *nr* : c'est lorsque le plan d'incidence, sur cette glace, est perpendiculaire au plan d'incidence S*np* sur la glace *n*. Telle est la position représentée dans le dessin. Dans toute autre position, le faisceau polarisé est toujours réfléchi par la glace *m* en quantité variable, et le maximum de lumière réfléchie a lieu lorsque les plans d'incidence, sur les glaces *m* et *n*, sont parallèles entre eux. Si la glace *m* fait avec la verticale un angle plus grand ou plus petit que 35°25', le faisceau polarisé est toujours réfléchi dans toutes les positions du plan d'incidence.

POLARISATION ROTATOIRE.

495. **Rotation du plan de polarisation.** — *Définition du phénomène.* — Lorsqu'un rayon polarisé traverse une plaque de quartz taillée perpendiculairement à l'axe de cristallisation, ce rayon est encore polarisé à l'émergence, mais non plus dans le même plan de polarisation qu'avant son passage dans le quartz. Avec certains échantillons, le nouveau plan est tourné à gauche de l'ancien; avec d'autres, il l'est à droite. C'est à ce phénomène qu'on a donné le nom de *polarisation rotatoire*. Biot en a trouvé les lois.

Lois. — 1° *La rotation du plan de polarisation n'est pas la même pour les diverses couleurs simples; elle est d'autant plus grande que ces couleurs sont plus réfrangibles.*

2° *Pour une même couleur simple et pour des plaques d'un même cristal, la rotation est proportionnelle à l'épaisseur.*

3° *Dans la rotation de droite à gauche ou de gauche à droite, la même épaisseur imprime sensiblement la même rotation.*

496. **Coloration produite par la polarisation rotatoire.** — Quand on regarde avec un *prisme biréfringent*[1] une lame de quartz de quelques millimètres d'épaisseur, taillée perpendiculairement à l'axe, et traversée par un faisceau de lumière polarisée, on observe deux images vivement colorées : leurs teintes sont complémentaires, car, en se recouvrant par leurs bords, elles donnent du blanc (fig. 509). Et si l'on tourne alors le prisme, les deux images changent de teinte et prennent successivement toutes les couleurs du spectre, tout en continuant à être complémentaires.

Fig. 508.

Ces phénomènes de coloration s'observent très bien avec l'appareil de Norremberg (fig. 508). Pour cela on place sur l'écran *e* une plaque de quartz *s*, taillée perpendiculairement à l'axe et fixée dans un disque de liège; puis, la glace *n* étant inclinée de manière à faire passer dans le quartz un faisceau polarisé, on regarde au travers d'un prisme biréfringent *g*, et, en faisant tourner le tube dans lequel est ce prisme, on observe les images complémentaires dont nous avons parlé ci-dessus (fig. 508).

Ce phénomène est une conséquence de la première loi. En effet, Biot a reconnu que le quartz fait tourner le plan de polarisation du rayon rouge de près de 17° 50′, celui du rayon violet de 41° 5, et ceux des autres rayons d'angles intermédiaires; par suite, lorsque la lumière polarisée qui a traversé la plaque de quartz émerge, les diverses couleurs simples qu'elle renferme sont polarisées dans des plans différents. Par conséquent, lorsque le faisceau ainsi transmis par le quartz est reçu à travers un prisme biréfringent qui le décompose en deux autres polarisés à angle droit, les diverses couleurs simples se partagent inégalement entre les deux images, ordinaire et extraordinaire, fournies par le prisme ; d'où il résulte que ces images sont nécessairement complémentaires, les couleurs qui manquent à l'une se retrouvant dans l'autre.

Fig. 509.

497. **Pouvoir rotatoire des liquides. — Expériences de Biot.** — Jusqu'en 1815

1. Le *prisme biréfringent* (fig. 508) est un polariscope ou analyseur très employé.

on ne connaissait que le pouvoir rotatoire du quartz. A cette époque, Biot retrouva cette propriété dans un grand nombre de liquides, tels que l'eau sucrée, la solution d'acide tartrique, l'essence de térébenthine, etc. Il opérait avec de la lumière simple, car avec de la lumière blanche on aurait eu des phénomènes de coloration moins faciles à apprécier que l'extinction. Il trouva d'abord que, parmi les liquides ou les dissolutions qui jouissent du pouvoir rotatoire, les uns font tourner à droite le plan de polarisation, comme le *quartz droit*, et les autres le font tourner à gauche, comme le *quartz gauche*. Il nomma les premières substances *dextrogyres* : telles sont le *sucre de canne* (en dissolution dans l'eau), l'*essence de citron*, la *teinture de camphre* (dissolution alcoolique de camphre), la *dextrine*, l'*acide tartrique*; il nomma les autres substances *lévogyres* : telles sont l'*essence de térébenthine*, l'*essence de laurier*, la *gomme arabique*.

Il trouva en outre que la rotation produite par les liquides est beaucoup moindre que celle du quartz, à épaisseur égale. Ainsi, le sirop de sucre de canne concentré, qui est une des substances les plus actives, fait tourner *trente-six fois moins* que le quartz.

Il trouva enfin que la rotation du plan de polarisation peut faire connaître, dans une dissolution, des altérations ou des changements de constitution que l'analyse chimique serait impuissante à révéler. Par exemple, le *sucre de raisin* fait tourner à gauche le plan de polarisation, tandis que le *sucre de canne*, toutes choses égales d'ailleurs, le fait tourner à droite, et cependant les deux substances sont identiques au point de vue de la composition chimique.

3° *Loi de Biot. — Pouvoir rotatoire moléculaire.* — La rotation imprimée au plan de polarisation par une même substance en dissolution dépend, — toutes choses égales d'ailleurs, — du degré de concentration de cette dissolution, ainsi que de l'épaisseur de la couche liquide traversée par la lumière. Biot a déterminé la loi de ces variations.

La rotation du plan de polarisation produite par une solution active est proportionnelle au poids de la substance dissoute dans l'unité de volume du liquide neutre et à la longueur du tube dans lequel on l'observe.

Par exemple, l'expérience prouve que, en opérant sur du sucre sec, il faut en dissoudre 16,51 g dans 0,1 litre d'eau et observer la dissolution dans un tube de 20 centimètres pour obtenir la même rotation qu'avec une plaque de quartz de 1 millimètre d'épaisseur.

Soit donc V le volume d'une solution contenant un poids P de la substance active, le poids dissous dans l'unité de volume sera $\frac{P}{V}$; si l'on observe cette dissolution dans un tube de longueur L, la rotation α imprimée au plan de polarisation sera, d'après la loi de Biot, proportionnelle à $\frac{P}{V}$ L. En désignant par ρ un coefficient qui est constant pour une même substance dissoute, mais qui est variable d'une substance à l'autre, on aura pour expression algébrique de la loi de Biot

$$\alpha = \rho \frac{PL}{V}.$$

Le coefficient ρ s'appelle le *pouvoir rotatoire moléculaire* de la substance active.

Valeur numérique de ρ. — La valeur numérique du *pouvoir rotatoire moléculaire* d'une substance active dépend donc à la fois de la couleur prise pour type, ainsi que des unités de longueur, de volume et de poids adoptées.

La saccharimétrie étant l'opération la plus usuelle de ce genre de recherches,

il convient de lui emprunter ses unités[1]. On rapportera donc les rotations « aux *rayons jaunes*, en prenant pour unité de poids le *gramme*, pour unité de volume le *décilitre* et pour unité de longueur le *décimètre*.

On définira alors le *pouvoir rotatoire moléculaire* de la manière suivante : c'est *la rotation imprimée aux vibrations des rayons jaunes par une dissolution qui contiendrait 1 gramme de substance active par décilitre et qu'on observerait dans un tube de 0,1 m de longueur.*

Soit, par exemple, 24° la rotation observée, dans un tube de 0,2 m, pour une solution de sucre de canne contenant 16,35 g au décilitre, on aura

$$24 = \rho\,\frac{16{,}35 \times 2}{1}, \qquad \text{d'où} \qquad \rho = 0^{\circ},734 \quad \text{ou} \quad 44^{\circ}20'.$$

498. **Applications de la polarisation rotatoire.** — La détermination du pouvoir rotatoire moléculaire des différentes substances actives fournit un moyen précieux d'apprécier le degré de concentration ou le degré de pureté de leurs dissolutions. Voici un exemple de cette application.

On a vu qu'en dissolvant 16,35 g de sucre pur dans 0,1 litre d'eau, et en observant la dissolution dans un tube de 0,2 m, on fait tourner de 24° vers la droite le plan de polarisation des rayons jaunes : c'est la rotation qu'on obtiendrait avec une plaque de 1 mm de quartz droit. Supposons qu'on ait acheté de la cassonade et qu'on veuille connaître la quantité de *sucre pur* qu'elle contient. On n'aura qu'à en peser 16,35 g et les faire dissoudre dans 0,1 litre d'eau pure, filtrer et clarifier la dissolution, la verser dans un tube de 0,2 m de long, et chercher de combien elle fait tourner vers la droite les vibrations jaunes. Ou plutôt, au lieu d'opérer directement de cette manière, on cherchera quelle épaisseur de *quartz gauche* il faut superposer à la dissolution pour annuler sa rotation. Si nous trouvons, par exemple, qu'il faut une plaque de 0,80 mm, nous en conclurons que le *sucre brut* essayé contenait 80 pour 100 de *sucre cristallisable*. Aucune méthode d'analyse chimique n'est aussi sûre ni aussi expéditive que cette méthode physique.

L'essai des sucres est l'usage de beaucoup le plus fréquent de la polarisation rotatoire. C'est ce qui a fait donner le nom de *saccharimétrie* à cette méthode d'analyse, et celui de *saccharimètres* aux instruments qu'on a construits pour appliquer la méthode. Mais l'industriel n'est pas le seul à s'en servir. Le physiologiste peut étudier de la même manière les variations de l'albumine dans le sang et dans les autres liquides de l'organisme ; le médecin peut suivre au saccharimètre la marche de la maladie appelée *diabète sucré*.

499. **Saccharimétrie et Saccharimètres : Principe et Méthode, Organes essentiels.** — Le saccharimètre est donc un instrument qui sert à déterminer non pas précisément la rotation qu'une substance active peut imprimer aux vibrations jaunes, mais l'épaisseur de la lame de quartz qui est capable de produire une rotation égale. Et cette détermination se fait par la méthode de *compensation*, c'est-à-dire en compensant la rotation de la substance, dextrogyre ou lévogyre, qu'on étudie à l'aide d'une plaque de quartz faisant tourner en sens contraire.

Cette méthode de compensation est fondée sur ce fait que, lorsqu'on superpose deux substances actives, de signe contraire, *la rotation totale*, imprimée par le système, est égale *à la somme algébrique* des rotations de chaque substance. Si, par exemple, on prend 2 lames de quartz, dont l'une fait tourner les vibrations rouges de 18° vers la droite, et l'autre les fait tourner de 18° vers la gauche, le système des deux quartz superposés sera *inerte* comme une lame de verre de même épaisseur ; il ne produira aucun effet de rotation, ni dans la lumière rouge, ni dans la lumière blanche.

1. A. Bertin, *loc. cit.*

L'opticien Soleil a construit, d'après ce principe, deux petits appareils qui sont les organes essentiels de tout *saccharimètre* : ce sont la *plaque à deux rotations* et le *compensateur*.

1° *Plaque à deux rotations. — Teinte sensible.* — Cet appareil se compose de deux plaques de quartz, de rotation contraire et de même épaisseur, non pas superposées, mais *accolées*, *juxtaposées*. Ce système fournit le moyen le plus délicat que l'on connaisse de mettre l'analyseur du saccharimètre *au* 0°, c'est-à-dire dans la position de l'extinction.

Pour cela on donne à chacun des quartz, non pas une épaisseur quelconque, mais une épaisseur rigoureusement égale à 7,5 mm. Comme 1 mm de quartz tourne la vibration jaune exactement de 24°, une plaque de 7,5 mm tournera la même vibration de $24° \times 7,5$ ou 180°. Mais 180° et 0° c'est tout un dans le mouvement d'orientation d'un analyseur, puisque ces deux azimuts sont dia-

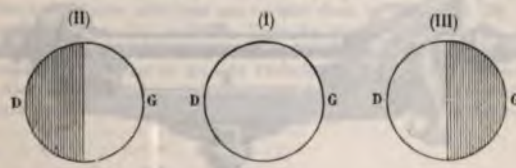


Fig. 510.

métralement opposés dans un cercle. Supposons donc qu'on ait un appareil de polarisation quelconque, et qu'on y ait placé l'analyseur *à l'extinction* dans la lumière blanche : si l'on y interpose la plaque à deux rotations, les rayons jaunes seront éteints par les deux quartz, et les deux moitiés de l'image seront l'une et l'autre colorées de la teinte complémentaire du jaune. Si, par exemple, l'analyseur est un nicol, l'image unique qu'il donnera sera colorée uniformément de cette teinte complémentaire du jaune (fig. 510, I). Mais pour peu qu'on dérange le nicol, d'un côté ou de l'autre, les deux moitiés de l'image, correspondant aux deux moitiés de la plaque, changeront en sens inverse, et l'on s'en apercevra immédiatement, à cause de l'opposition des couleurs produites (fig. 510, II et III).

Cette teinte complémentaire du jaune est un certain *violet pâle* ou *violet rose* connu sous le nom de *teinte sensible*. La teinte est pâle, parce qu'elle correspond à l'extinction des rayons jaunes, qui sont les plus brillants du spectre.

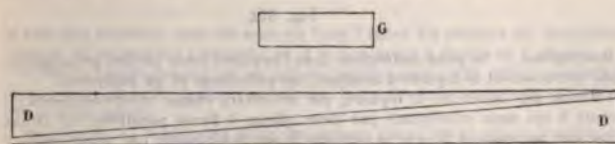


Fig. 511.

Elle est d'autant plus facile à apercevoir, et, par suite, d'autant plus *sensible*, qu'elle est placée entre un *rouge* et un *bleu*, qu'on obtient en tournant légèrement l'analyseur soit *à droite*, soit *à gauche*.

2° *Compensateur.* — Le *compensateur* est constitué par deux quartz de rotations contraires, non plus *juxtaposés*, mais *superposés*. L'un, G, est fixe et

lévogyre (fig. 511) et d'une seule pièce ; l'autre est divisé diagonalement en deux prismes très aigus, D, D, qui glissent l'un sur l'autre au moyen d'une crémaillère. (La figure 511 représente l'appareil schématiquement, et la figure 513, II, le représente tel qu'il sert dans le saccharimètre de Soleil.) Il résulte de ce glissement que le second quartz, qui est dextrogyre, présente au rayon une épaisseur qui peut varier depuis zéro jusqu'à une épaisseur *supérieure* à celle du premier quartz. On peut arriver ainsi à la compensation exacte par degrés insensibles et apprécier des variations d'épaisseur très petites au moyen des divisions d'une règle qui mesure le déplacement des deux prismes (fig. 513, III).

500. **Saccharimètre de Soleil.** — C'est l'opticien Soleil qui a construit le premier saccharimètre (fig. 512).

Fig. 512.

1° *Description.* — On peut distinguer dans l'appareil trois parties principales : un tube qui contient le liquide à analyser, un polariseur et un analyseur.

Le tube *m*, qui renferme le liquide, est de cuivre étamé intérieurement ; il est fermé à ses deux extrémités par deux glaces à faces parallèles et il est soutenu par un support *k*, qui se termine à ses deux bouts par deux tubes *r* et *a*, dans lesquels sont les cristaux qui servent de polariseurs et d'analyseurs : ils sont représentés dans la coupe (fig. 513).

Devant l'orifice S se place une lampe ordinaire à modérateur. La lumière émise par cette lampe, dans la direction de l'axe de l'instrument, rencontre d'abord un prisme biréfringent *r*, qui sert de polariseur. L'image ordinaire seule arrive à l'œil, l'image extraordinaire étant rejetée hors du champ de la vision, à cause de l'amplitude de l'angle que font entre eux le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire. Enfin le prisme biréfringent est dans une position

telle, que le plan de polarisation soit vertical et passe par l'axe de l'appareil.

A sa sortie du prisme biréfringent, le faisceau polarisé rencontre une plaque à double rotation, dont nous avons expliqué l'usage.

Après avoir traversé le quartz *q*, le faisceau polarisé passe dans le liquide que contient le tube *m*, et de là rencontre un compensateur, formé d'un quartz simple *i* et du double quartz *n*. Le mouvement des deux moitiés du compensateur s'obtient au moyen d'une double crémaillère et d'un pignon qu'on tourne à l'aide d'un bouton *b* (fig. 512 et 513, I).

Quand les lames se déplacent respectivement dans le sens indiqué par les flèches (fig. 513, II), il est évident que la somme de leurs épaisseurs augmente; elle diminue au contraire quand les plaques avancent dans le sens opposé. Une échelle *e* et un vernier *v* (fig. 513, III) suivent les plaques dans leur mouvement, et servent à mesurer les variations d'épaisseur du compensateur. Cette échelle, représentée ainsi que son vernier dans la figure 513 (III), porte deux divisions ayant un zéro commun, l'une de gauche à droite pour les liquides dextrogyres, l'autre de droite à gauche pour les liquides lévogyres.

Lorsque le vernier est au zéro de l'échelle, la somme des épaisseurs des plaques N et N' est précisément égale à celle de la plaque *i*, et comme la rotation de cette dernière est contraire à celle du compensateur, l'effet est nul. Mais

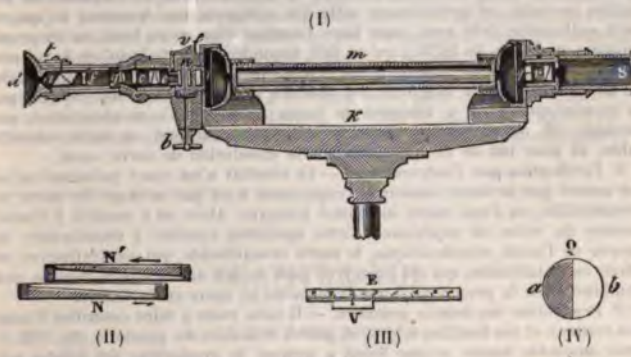


Fig. 513.

si l'on fait marcher dans un sens ou dans l'autre les plaques du compensateur, celui-ci ou le quartz *i* l'emporte, et il y a rotation à droite ou à gauche.

Après le compensateur est un prisme biréfringent *c* (fig. 513, I) servant d'analyseur pour observer le faisceau polarisé qui a traversé le liquide et les diverses plaques de quartz.

Opération. — Négligeons pour un instant les cristaux et les lentilles représentés à sa gauche dans le dessin. Si l'on fait d'abord coïncider le zéro du vernier *v* avec celui de l'échelle, et si le liquide contenu dans le tube est inactif, les actions du compensateur et de la plaque *i* se détruisent, et, l'effet du liquide étant nul, les deux moitiés de la plaque *q*, vues au travers du prisme *c*, donnent rigoureusement la même teinte, ainsi qu'on l'a déjà observé. Mais si l'on remplace le tube plein de liquide inactif par un second tube rempli d'une dissolution sucrée, le pouvoir rotatoire de celle-ci s'ajoute à celui de même sens de l'un des quartz de la plaque à double rotation *p*, et diminue d'autant le pouvoir rotatoire de l'autre quartz. Il résulte de là que les deux

moitiés de la plaque q ne présentent plus la même teinte, et que la moitié a (fig. 513, IV) est rouge, par exemple, tandis que la moitié b est bleue. On fait alors marcher les prismes du compensateur, en tournant le bouton b vers la droite ou vers la gauche, jusqu'à ce que la différence d'action du compensateur et de la plaque i compense le pouvoir rotatoire de la dissolution, ce qui a lieu lorsque les deux moitiés de la plaque q à double rotation reviennent à leur teinte primitive.

Quant au sens de la déviation et à l'épaisseur du compensateur, on les mesure par le déplacement relatif de l'échelle e et du vernier v. Les divisions de l'échelle sont telles, que 10 de ces divisions correspondent à une variation de 1 millimètre dans l'épaisseur du compensateur, et comme le vernier donne lui-même les dixièmes de ces divisions, il en résulte qu'il mesure des variations de 1/100 de millimètre dans l'épaisseur du compensateur.

2° *Calcul de l'expérience.* — Une fois que la teinte des deux moitiés de la plaque q est redevenue uniforme, comme avant l'interposition de la dissolution sucrée, on lit sur l'échelle à quelle division correspond le vernier : le nombre correspondant donne immédiatement le titre de la dissolution. En effet, nous avons vu que 16,35 g de sucre candi, bien desséché et bien pur, étant dissous dans l'eau, et la liqueur étant amenée au volume de 1 décimètre cube et observée dans un tube de 2 décimètres de longueur, la déviation produite est précisément celle que comporte une épaisseur de quartz de 1 millimètre. Cela posé, pour faire l'analyse d'un sucre brut, on en prend toujours un poids de 16,35 g qu'on fait dissoudre dans de l'eau, et, le volume de la dissolution étant amené à 100 centimètres cubes, on en remplit le tube de 20 centimètres de longueur. On observe ensuite le nombre indiqué par le vernier quand on a retrouvé la teinte primitive. Ce nombre étant, par exemple, 42, on en conclut que cette dissolution contient, en sucre cristallisable, 42 pour 100 de ce que contenait la dissolution de sucre candi.

3° *Vérification par l'interversion.* — Ce résultat n'est exact qu'autant qu'on est assuré que le sucre soumis à l'expérience n'est pas mélangé de sucre incristallisable, ou d'une autre substance lévogyre. Alors on a recours à l'*interversion* du sucre en expérience. Cette opération consiste à transformer, au moyen de l'acide chlorhydrique, le sucre cristallisable, qui est dextrogyre, en sucre incristallisable, qui est lévogyre; puis on fait une nouvelle mesure qui, combinée avec la première, donne la quantité de sucre cristallisable.

4° *Producteur des teintes sensibles.* — Il nous reste à faire connaître l'usage des cristaux et des lentilles o, g, f, a, placés à la suite du prisme c (fig. 512, I). Leur ensemble forme ce que Soleil a nommé le *producteur des teintes sensibles.* En effet, la teinte la plus sensible, c'est-à-dire celle qui permet de distinguer une différence très faible dans la coloration des deux moitiés de la plaque de rotation, n'est pas la même pour tous les yeux : pour le plus grand nombre, c'est la nuance d'un bleu violacé rappelant celle de la *fleur de lin* que nous avons définie ci-dessus. L'appareil de Soleil permet de produire à volonté la *teinte sensible*, ou toute autre nuance plus sensible pour l'observateur.

Pour cela, en avant du prisme c est d'abord une plaque de quartz o taillée perpendiculairement à l'axe, puis une petite lunette de Galilée formée d'un verre biconvexe g et d'un verre biconcave f, pouvant se rapprocher entre eux, ou s'écarter suivant la distance de la vue distincte de l'observateur; enfin l'appareil se termine par un prisme de Nicol a, qu'on tourne à volonté sur lui-même. Le prisme biréfringent c agissant comme polariseur par rapport au quartz o, et le prisme a comme analyseur, lorsqu'on tourne ce dernier à *droite ou à gauche*, la lumière qui a traversé le prisme c et la plaque o change *de teinte*, et finit par donner celle que l'expérimentateur a adoptée pour *teinte fixe.*

501. **Saccharimètre à pénombres.** — Dans le saccharimètre de Soleil, certaines

vues n'apprécient qu'avec difficulté l'instant précis où les deux plaques *q* reviennent exactement à leur teinte rose-violacé primitive. Pour obvier à cet inconvénient, M. Jellet a imaginé le *saccharimètre à pénombres*. Dans cet appareil l'éclairage est produit avec une lumière monochromatique (le jaune de la raie du sodium), et le polariseur est modifié de manière que l'œil n'ait plus à comparer deux couleurs différentes, mais deux intensités d'une même couleur, ou plutôt de deux pénombres; — car la lumière du sodium s'efface en réalité dans l'appareil pour ne donner que deux pénombres dans le champ de l'oculaire — : ce qui permet à l'œil d'obtenir beaucoup plus exactement les moindres variations. C'est donc l'égalité de ces deux pénombres qui remplace la teinte de passage du saccharimètre de Soleil; et alors, c'est l'angle de rotation qu'il faut imprimer à l'analyseur pour égaliser les deux pénombres qui fait connaître la richesse du liquide sucré.

502. **Analyse de l'urine des diabétiques.** — Dans la maladie connue sous le nom de *diabète sucré*, les urines sont chargées d'une forte quantité d'un sucre fermentescible qu'on nomme *sucre de diabète*. Ce sucre, à l'état naturel dans les urines, fait tourner le plan de polarisation à droite. Pour le doser dans les urines des diabétiques, on commence, si celles-ci ne sont pas assez limpides, par les clarifier par le sous-acétate de plomb; on filtre, on remplit le tube *m* de l'urine clarifiée, puis on tourne le bouton *b* jusqu'à ce qu'on obtienne, pour la plaque à deux rotations, la même teinte qu'avant l'interposition de l'urine. On sait d'ailleurs, par un essai préalable, que 100 parties de l'échelle du saccharimètre représentent le déplacement à donner aux quartz compensateurs lorsqu'il entre dans l'urine 225,6 g de sucre par litre; il en résulte que chaque division de l'échelle représente 2,256 g de sucre. Donc, pour obtenir la quantité de sucre contenue dans une urine donnée, il suffit de multiplier 2,256 g par le nombre qu'indique le vernier au moment où l'on retrouve la teinte primitive.

CHAPITRE VIII

PHOTOGRAPHIE[1].

503. **Définition. — Historique.** — La photographie[2] comprend l'ensemble des procédés et des méthodes qui permettent de fixer l'image des objets par l'action de la lumière sur différentes substances sensibles à cette action.

La photographie est une découverte française, et c'est le 19 avril 1839 qu'Arago présenta à l'Académie les résultats des travaux communs de Niepce et de Daguerre, en réclamant pour

1. Ce chapitre a été revu par M. *A. Londe*, chef du service photographique à la Salpêtrière. Nous renvoyons le lecteur, pour tous les détails complémentaires, à l'excellent traité *élémentaire* de photographie de M. Londe, publié chez *J.-B. Baillière et fils, sous le nom d'Aide-mémoire pratique* de Photographie.

2. De φῶς, φωτός, lumière, et γράφειν, écrire. C'est proprement l'art d'écrire ou *de dessiner à l'aide de la lumière.*

les deux inventeurs et les héritiers (Niepce était mort en 1855) une récompense nationale.

Daguerréotypie. — Le procédé prit le nom de Daguerre, seul survivant. Il consistait à recevoir l'image donnée par une lentille convergente sur une plaque de cuivre doublée d'argent et sensibilisée par une exposition préalable à la vapeur d'iode.

Fig. 514.

On renfermait la plaque sensible dans un châssis de bois, où elle était recouverte, du côté argenté, par un écran à coulisse. On la portait en cet état dans une petite chambre portative, qu'on appelait jadis le *daguerréotype* (fig. 514).

C'est une *chambre obscure*, à tirage, composée d'une partie fixe C, et d'une

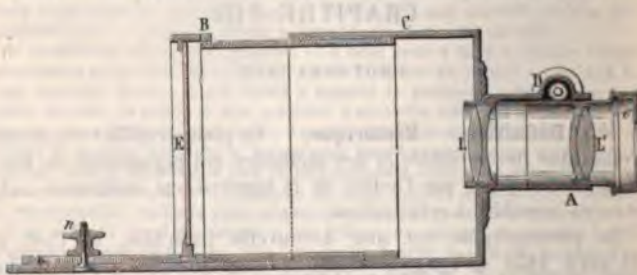


Fig. 515.

partie mobile B, qui peut entrer plus ou moins dans la première (fig. 515). Dans un tube de laiton A est l'*objectif*. Il consista d'abord en une seule lentille biconvexe achromatique; mais on ne tarda pas à adopter des objectifs à deux lentilles achromatiques L, L', qu'on désigne sous le nom d'*objectifs à verres combinés*. Dans l'un de ces daguerréotypes, la lentille L étant fixe, on mettait *au point* avec la seconde lentille L', portée dans un tube mobile qui peut avan-

cer ou reculer plus ou moins à l'aide d'une crémaillère et d'un pignon D. La paroi opposée à l'objectif est un écran de verre dépoli, appelée *glace dépolie*, fixée dans un cadre E qui s'enlève à volonté.

Lorsqu'il était temps d'arrêter l'action de la lumière, on abaissait l'écran à coulisse, et on retirait le châssis. Si l'on regardait la plaque à ce moment, on n'apercevait encore aucune trace d'image ; pour rendre celle-ci visible, on exposait la plaque à l'action de *vapeurs de mercure, à 75° C environ*. Les vapeurs se déposent, en gouttelettes imperceptibles, sur les parties qui ont été fortement éclairées, et, au bout de quelques minutes, il se forme un amalgame d'argent qui donne les *blancs* de l'épreuve, tandis que les autres parties restent noires par l'effet même du bruni de la plaque. L'image est alors visible, et peut rester exposée à la lumière. Toutefois la plaque reste encore recouverte d'une couche d'iodure d'argent, qui donne à l'épreuve une teinte rougeâtre. On la fait disparaître en lavant la plaque dans une dissolution d'hyposulfite de soude.

Ce procédé avait l'inconvénient de donner des images uniques, miroitantes et inversées. De plus, la durée de pose était assez grande, et la résistance de l'image très faible.

Dans les derniers temps de la daguerréotypie, on était arrivé à augmenter la sensibilité de la couche par la formation sur la plaque d'un mélange d'iodure et de bromure d'argent, puis à la consolider par une méthode de dorure au moyen de l'hyposulfite double d'or et de sodium (Fizeau).

La daguerréotypie n'a plus été employée que pour des observations nécessitant une grande précision (passage de Vénus, éclipses de Soleil) et elle est maintenant complètement abandonnée.

Remarques. — 1° *Coloration de certaines épreuves daguerriennes.* — Il est à remarquer que dans ce procédé la couche se présentait dans les conditions découvertes depuis par M. Lippmann pour la photographie des couleurs, et c'est ce qui explique les quelques exemples de plaques présentant les colorations du modèle qui ont été signalées.

2° *Images latentes.* — D'autre part, c'est dans le procédé de Daguerre qu'est signalée pour la première fois l'*image latente* qui, dessinée par la lumière, reste néanmoins absolument invisible et n'apparaît que sous l'action de réactifs particuliers.

504. **Découvertes postérieures à la Daguerréotypie.** — En 1840, Fox Talbot indique la possibilité d'employer d'autres substances que les vapeurs de mercure pour révéler l'image latente, et il obtient l'*image négative*, permettant de tirer un nombre indéfini d'*épreuves positives*, ayant toutes les valeurs de l'original et le même sens que lui.

Le procédé de Talbot, dans lequel la couche sensible est étendue sur papier, est simplifié par Blanquard Évrard en 1847.

En 1848, Niepce de Saint-Victor propose le verre comme substratum de la couche sensible, laquelle est formée de gélatine ou d'albumine, d'abord iodurées, puis passées au bain d'argent.

En 1850, Fry et Archer remplacent l'albumine et la gélatine par le collodion, et indiquent le procédé du *collodion humide*, qui a constitué un progrès considérable.

En 1855, Taupenot indique un procédé permettant d'employer les préparations à l'état sec. Ce progrès était très important également, car il permettait d'opérer loin du laboratoire. Ce procédé, perfectionné et simplifié par le major Russell en 1861, est connu sous le nom de *procédé au tannin*.

Enfin, dès 1861, Gaudin préparait un liquide tout sensible d'avance, et qu'il suffisait d'étendre sur la plaque. Les recherches dans cette voie ont été nombreuses et ont abouti d'une part au procédé de l'*émulsion au collodion sec*, et d'autre part au procédé du *gélatino-bromure d'argent* (émulsion à la gélatine bromurée).

505. **Classification des divers procédés photographiques.** — En résumé, tous les procédés de photographie sur papier ou sur verre comprennent deux opérations distinctes. Par la première, on obtient une image dont les teintes sont renversées, c'est-à-dire où les parties claires sont devenues noires, et inversement : c'est l'*image négative* ou le *négatif*. Dans la seconde opération, la première image sert à en former une seconde dont les teintes sont renversées de nouveau, et se retrouvent, par conséquent, dans leur ordre naturel : c'est l'*image positive* ou le *positif*.

On peut classer les divers procédés photographiques d'après la manière dont on prépare la couche sensible. Tous, sauf celui de Daguerre, donnent d'abord des *négatifs* :

1° Par vapeurs. . . . — Daguerréotypie.		
2° Par trempage . . .	Collodion humide.	
	Procédés secs.	Albumine.
		Collodion albuminé.
		Collodion sec.
3° Par émulsionnage. — Émulsions .		Collodion bromuré.
		Collodion chloruré.
		Gélatino-bromure.
		Gélatino-chlorure.

Dans le premier groupe, le sel sensible à la lumière est obtenu en exposant une lame argentée à l'action directe des vapeurs d'iode.

Dans le deuxième groupe, un véhicule (collodion ou albumine) contenant des iodures ou bromures alcalins solubles est étendu sur la plaque, puis celle-ci est plongée dans un bain d'azotate d'argent, qui, par double décomposition, produit, dans le véhicule même, les iodures et bromures d'argent sensibles à la lumière.

Lorsque les azotates alcalins ne sont pas éliminés, la couche ne garde pas longtemps ses propriétés et il faut l'employer de suite : c'est le cas du collodion humide. Au contraire, lorsqu'ils sont enlevés par un lavage convenable, la couche peut se conserver pendant un certain temps. Cette durée de conservation est d'ailleurs augmentée par l'emploi de diverses substances mucilagineuses ou tanniques qui constituent les *préservateurs*.

Dans le troisième groupe, on réalise de toutes pièces le sel sensible en versant une solution d'azotate d'argent dans la masse du véhicule choisi (collodion ou gélatine), contenant déjà les bromures, chlorures ou iodures ; on a ainsi, par double décomposition, des azotates alcalins, — dont on se débarrasse, — puis des bromures, chlorures, iodures d'argent, à l'état d'émulsion, qu'on

n'a plus qu'à étendre sur le support (verre ou autres substances). Les plaques obtenues s'emploient à l'état sec et ont une durée de conservation très prolongée.

Le procédé à l'émulsion au gélatino-bromure a rejeté dans l'oubli la plupart des procédés antérieurs. Deux seulement ont persisté, celui à l'albumine, qui permet d'obtenir des épreuves *diapositives* transparentes sur verre pour la projection ou pour le stéréoscope[1], et celui au collodion humide, qui, à cause de sa facilité d'emploi, de sa finesse et de sa transparence, est toujours employé dans l'industrie photographique.

506. **Procédé au collodion humide.** — Ce procédé repose sur l'emploi du collodion comme véhicule de la couche sensible.

1° *Préparation de la plaque sensible.* — Celle-ci est constituée par un mélange d'iodure et de bromure d'argent. Le collodion *normal* est une dissolution de coton-poudre dans un mélange d'éther et d'alcool[2]; mélangé d'une certaine solution iodo-bromurée, composée d'iodures et de bromures alcalins susceptibles de se transformer dans le bain d'argent en iodures et bromures d'argent, il prend le nom de *collodion sensibilisé*[3].

Pour constituer le collodion sensibilisé, on prend

Collodion normal	90 parties.
Liqueur iodo-bromurée.	10 —

Ce collodion est étendu sur la plaque, préalablement nettoyée avec le plus grand soin; dès que l'éther et l'alcool sont suffisamment évaporés, on procède à la sensibilisation proprement dite, au sel d'argent; elle s'effectue, dans une pièce éclairée à la lumière jaune, en plongeant la plaque dans le bain d'argent ainsi constitué :

Azotate d'argent	7 à 8 cm³
Eau distillée.	100 —
Iodure de potassium	qq. traces.
Acide nitrique.	1 à 2 gouttes.

1. Le procédé à l'albumine, qui est très délicat et exige certains tours de main, n'est plus employé que par quelques rares opérateurs. C'est celui dont M. Lippmann se sert de préférence pour photographier les couleurs.

2. Voici une bonne formule du *collodion normal* :

Coton-poudre	10 à 12 cm³ suivant la solubilité.
Éther sulfurique rectifié à 65° .	600 cm³
Alcool rectifié à 40°	300 cm³

3. Voici la formule de cette liqueur iodo-bromurée:

Alcool absolu (densité : 0,795).	250 cm³
Iodure d'ammonium	10 g.
Iodure de cadmium	10 g.
Bromure de cadmium	10 g.

La plaque blanchit rapidement par suite de la formation d'iodure d'argent : on doit la retirer lorsque le bain coule librement à sa surface et ne forme plus de traînées huileuses.

2° *Pose.* — L'exposition doit se faire tout de suite, car, dès que la plaque est sèche, elle perd toutes ses qualités; elle est de 20 à 30 fois plus longue qu'avec le gélatino-bromure d'argent.

3° *Développement.* — Pour faire apparaître l'image latente, il suffit de projeter sur la plaque une solution de sulfate de fer additionnée d'acide acétique, d'après la formule suivante :

Eau	1000 g
Acide acétique cristallisable	25 —
Alcool à 56°.	51 —
Sulfate double de fer et d'ammoniaque	50 —

L'image apparaît tout de suite [1].

4° *Fixage.* — Il s'opère dans une solution d'hyposulfite de soude (20 pour 100) ou de cyanure de potassium (2 à 3 pour 100).

On termine par un lavage soigné, puis la couche une fois sèche est recouverte d'un vernis protecteur.

Remarque. — Les avantages du collodion humide sont, outre le faible prix de revient, la facilité d'emploi, la pureté et la transparence des images obtenues, et enfin la nature de la couche; celle-ci peut être facilement séparée du support dans le cas où l'on veut obtenir soit des assemblages de négatifs sur une même glace, soit des inversions de sens qui sont indispensables avec certains procédés de tirage industriels.

507. Procédé au gélatino-bromure d'argent. — Ce procédé est maintenant d'un emploi général et c'est grâce à son extrême sensibilité que les applications de la photographie aux différentes sciences deviennent de jour en jour plus nombreuses et plus importantes.

Préparation de l'émulsion. — L'émulsion au gélatino-bromure consiste essentiellement en un précipité de bromure d'argent tenu en suspension dans de la gélatine. Ce précipité est obtenu par double décomposition, en ajoutant du nitrate d'argent à une solution chaude de gélatine contenant déjà un bromure soluble. On élimine ensuite les azotates solubles à l'aide d'un lavage.

Maturation. — La sensibilité du produit obtenu est accrue par une opération toute particulière qu'on appelle la *maturation*; on la réalise en laissant vieillir l'émulsion, ou plus rapidement soit

1. Au cas où l'intensité de l'image ne serait pas suffisante, on la *renforce* en la lavant à l'aide de la solution suivante :

Eau distillée	100 g
Nitrate d'argent	3 —
Alcool	5 —
Acide acétique cristallisable	5 —

On fait alors agir de nouveau le révélateur, mais sans laver à nouveau.

par la coction, soit par l'addition d'une petite quantité d'ammoniaque. Quel que soit le procédé employé, le maximum de sensibilité est obtenu lorsque le bromure, qui est blanc-jaunâtre, est devenu vert par réflexion, sa coloration par transparence ayant passé d'autre part du jaune orangé au gris violet.

Préparation industrielle. — Le coulage des plaques au gélatino-bromure d'argent est fait dans l'industrie au moyen de machines spéciales, qui assurent une grande régularité de fabrication et une production considérable. Certaines machines peuvent couler facilement 20 000 à 30 000 plaques du format 13/18 par jour[1].

Pose. — La sensibilité du gélatino-bromure est supérieure de beaucoup à celle de tous les autres procédés; elle est due à l'emploi exclusif du *bromure d'argent*, émulsionné dans la gélatine.

Développement. — Il est basé sur l'emploi de réducteurs énergiques : parmi ceux-ci on emploie principalement l'oxalate ferreux, puis l'acide pyrogallique, l'hydroquinone, l'iconogène, le paramidophénol additionnés d'un alcali[2].

Dans la pratique on se sert de substances destinées à retarder ou tout au moins à empêcher la combinaison du réducteur avec l'oxygène de l'eau, et elles portent le nom de *conservateurs*.

D'auteurs substances, telles que les bromures et certains acides (citrique, formique, tartrique), constituent les *retardateurs*. Enfin, les *accélérateurs* sont destinés à accélérer la venue de l'image.

1° *Développement à l'oxalate ferreux.* — On prépare :

A	Oxalate neutre de potasse.	50 g
	Eau distillée.	100 —
B	Sulfate de protoxyde de fer.	30 —
	Eau distillée.	100 —
	Acide tartrique.	0,50

Pour l'usage, on verse 1 partie de B dans 3 parties de A. On ajoute au préalable une certaine quantité de bromure de potassium à 10 pour 100 proportionnée à la durée de l'exposition. En cas de pose normale, 1 à 2 gouttes suffisent. En cas de manque de pose, on n'emploie pas de bromure, mais quelques gouttes d'une solution d'hyposulfite de soude à 1/1000.

1. Les plaques sensibles au gélatino-bromure sont parfaitement fabriquées dans l'industrie et à un prix assez bas pour dispenser l'amateur de cette préparation.

2. De nombreux corps appartenant à la classe des phénols diatomiques ou triatomiques, des naphtols, des ammoniaques composées, jouissent des mêmes propriétés.

L'image vient rapidement et on la retire du bain lorsqu'elle possède tous les détails même dans les parties les plus sombres et qu'elle a l'intensité voulue pour donner de bons positifs.

2° *Développement à l'acide pyrogallique.* — Dans ce cas, les produits suivants sont nécessaires :

A	Acide pyrogallique en poudre.	
B	Sulfite de soude	25 g
	Eau	100 —
C	Carbonate de soude (du commerce)	25 —
	Eau	100 —
D	Bromure de potassium	10 —
	Eau	100 —

Par exemple, pour un cliché 13/18, on forme un bain avec

A	0,15 à 0,20 g.
B	20 cm³
D	qq. gouttes.
Eau	80 cm³

Après un séjour de quelques instants dans ce bain, on ajoute la solution C par petites quantités jusqu'à ce que l'image vienne. On la laisse alors monter tranquillement, en ajoutant de l'alcali si les détails sont insuffisants ou du réducteur si l'intensité fait défaut.

Opérations subséquentes au développement. — 1° *Fixage.* — Cette opération a pour but d'éliminer les sels d'argent non réduits par la lumière. On emploie pour cela une solution d'hyposulfite de soude à 20 pour 100. La plaque doit y séjourner jusqu'à ce que tout aspect laiteux de la couche ait disparu.

2° *Lavage.* — On procède ensuite à un lavage très prolongé qui a pour objet d'éliminer d'une manière absolue toutes traces d'hyposulfite de soude. La conservation des négatifs ne peut s'obtenir qu'à ce prix.

3° *Alunage.* — On emploie très souvent, après le fixage, un bain d'alun destiné à durcir la gélatine et à la rendre imputrescible.

4° *Séchage.* — Il doit s'effectuer à l'air libre, à l'abri de la poussière, et à une température modérée, sous peine de faire fondre la gélatine. Il dure de six à douze heures environ.

Séchage rapide. — Il suffit de plonger une plaque dans l'alcool méthylique à 90° pendant cinq à dix minutes, puis de l'essorer. On peut alors la sécher à une douce chaleur.

508. **Opérations accessoires. — Retouche du négatif.** — Si le négatif manque de détails dans certaines parties, aucun correctif n'est vraiment efficace, puisqu'il faudrait reconstituer une image qui n'a pas été imprimée par la lumière.

En ce qui concerne l'intensité du négatif, on peut l'augmenter ou la diminuer d'une manière générale, si elle est trop faible ou trop considérable : la première opération constitue le *renforcement*, la deuxième le *baissage*.

Renforcement au mercure et à l'ammoniaque. — Le négatif, après avoir été bien lavé, est plongé dans une solution de bichlorure de mercure à 25 pour 1000, jusqu'à ce que l'image apparaisse complètement blanche. On lave abondamment et on passe dans de l'eau légèrement ammoniacale. La teinte de l'image passe au brun foncé et acquiert une intensité remarquable. On termine par un bon lavage.

Baissage. — On prend parties égales d'une solution de ferricyanure de potassium à 5 pour 100 et d'une solution d'hyposulfite de soude également à 5 pour 100. L'image descend d'une manière régulière et arrive au point voulu. On termine par un bon lavage.

Retouche artistique. — La retouche a pour but d'enlever tous les défauts provenant soit du sujet lui-même, soit du cliché. La retouche se fait sur le cliché négatif, à l'aide d'un crayon bien taillé, et quelquefois d'un pinceau lorsqu'elle a besoin d'être plus accentuée. Lorsque la retouche doit se faire dans des parties noires du négatif trop accentuées qui donneraient des blancs trop crus, on se sert d'une aiguille emmanchée, qui permet de faire une série de points très légers ou de stries dans ces noirs à adoucir.

Fig. 516.

On fait cette opération à l'aide d'un châssis spécial dit *à retouche* (fig. 516), se composant d'une glace G inclinée à 45°, sur laquelle un miroir M renvoie la lumière du ciel ; on peut ainsi par transparence bien juger de la valeur du cliché et des effets de la retouche.

La retouche se fait encore sur la gélatine elle-même, parfois sur le vernis, c'est-à-dire après avoir recouvert la gélatine d'un vernis préservateur. Si l'on voulait faire *mordre* le crayon davantage, on pourrait appliquer, à l'aide du doigt, une composition spéciale à base de colophane et d'essence de térébenthine.

509. **Remplacement du verre comme support de la couche sensible. — Plaques pelliculaires et pellicules.** — A côté de remarquables qualités de transparence et de planité, le verre présente des inconvénients sérieux : son poids, son volume et sa fragilité.

D'autre part, dans l'emploi de certains procédés de tirage d'épreuves positives, il est nécessaire d'opérer par la face opposée à celle qui a reçu l'impression de la lumière, de façon à avoir finalement l'image positive dans le vrai sens. Aussi a-t-on cherché depuis longtemps à séparer facilement du verre la couche sensible, ou à couler celle-ci sur un support mince, léger et incassable.

L'interposition d'une couche de collodion normal entre le verre et la couche

sensible permet de détacher celle-ci avec la plus grande facilité. Les plaques ainsi préparées s'appellent *plaques pelliculaires*.

Les *pellicules* sont de nouveaux supports qui ont été préparés pour remplacer le verre : elles sont constituées par du papier, du collodion, du celluloïd ou de la gélatine insolubilisée. Elles sont préparées en feuilles ou en rouleaux de grande longueur. Dans le premier cas, elles s'emploient au lieu et place des glaces dans les châssis ordinaires. Dans le deuxième cas, elles nécessitent des châssis spéciaux, les *châssis à rouleaux* (fig. 522).

Remarque. — Les différentes pellicules proposées résolvent le problème au point de vue de la transparence, de la légèreté et de la non-fragilité ; mais, sous le rapport de la planité, elles sont inférieures au verre, et il faut, dans la pratique, employer des appareils spéciaux (extenseurs, etc.) pour leur donner cette planité. Souvent aussi l'adhérence entre le support et la couche n'est pas suffisante, et, d'autre part, les matières qui constituent le support réagissent lentement sur le bromure d'argent et en provoquent peu à peu l'altération. En un mot, la solution n'est pas encore tout à fait sûre et demande de nouveaux perfectionnements.

510. Matériel et manipulations photographiques. — L'image est obtenue dans la chambre noire soit au moyen d'une simple ouverture très étroite, soit, plus ordinairement, au moyen d'un objectif.

1° *Photographie sans objectif.* — Le premier procédé constitue la *photographie sans objectif*; il n'est que l'application directe de l'expérience classique de Porta sur la production des images par les petites ouvertures. Cette méthode devient pratique actuellement grâce à la rapidité du gélatino-bromure d'argent. Avec les anciens procédés, les durées d'exposition (qui varient encore de quelques secondes à plusieurs minutes) auraient été beaucoup trop grandes, étant donnée la faible quantité de rayons admis par des ouvertures qui n'ont que quelques dixièmes de millimètre.

Fig. 517.

Sans avoir une netteté comparable à celle des images obtenues avec les objectifs, les images obtenues dans ces conditions ont le précieux avantage de n'être nullement déformées et d'être également au point dans les différents plans.

2° *Objectifs photographiques* et *diaphragmes.* — Les objectifs photographiques sont composés d'un ou de plusieurs systèmes de lentilles qui sont *achromatisées* à la fois pour les rayons violets et jaunes. Ils sont munis de *diaphragmes mobiles* d'ouvertures variées qui permettent d'augmenter l'étendue du champ et la profondeur de foyer (fig. 517 et 518).

On peut les classer d'après l'angle embrassé : il varie de 1° à 40° environ pour les objectifs ordinaires, de 40° à 60° pour les

objectifs dits *demi grands angles*, et de 60° à 110° pour les objectifs dits *grands angles*.

La rapidité d'un objectif est définie à la fois par son ouverture et sa longueur focale principale[1]. On classe encore les objectifs en *rapides* ou *lents*, suivant que leur aplanétisme (403) plus ou moins parfait permet de les employer à pleine ouverture ou diaphragmés.

Diaphragmes. — L'emploi des diaphragmes a pour objet d'éliminer les rayons périphériques ou trop obliques, et par suite d'améliorer l'aplanétisme de l'objectif et la netteté de l'image.

Un diaphragme se compose essentiellement d'une ouverture circulaire plus ou moins grande. Tel est le *diaphragme tournant* de la figure 517, qui est un disque à plusieurs ouvertures, pouvant tourner devant la lentille d'un objectif grand angulaire

Fig. 518.

à court foyer et permettant de faire de très près les plus hauts monuments[2].

On emploie fréquemment le *diaphragme-iris* (fig. 518, I et II) : il est formé d'une série de lamelles (I) qu'on peut manœuvrer de l'extérieur de manière à réaliser toutes les variations d'ouverture. La figure 518 (I et II) représente un diaphragme-iris vu de face et de côté.

Les diminutions de diamètre du diaphragme entraînent, par suite de la suppression d'une certaine quantité de lumière, des augmentations correspondantes dans la durée d'exposition. Il résulte des lois générales de la variation d'intensité de la lumière que *le temps de pose* varie pour chaque objectif *en raison inverse*

1. D'après les décisions du Congrès international de Photographie (1889 et 1891), la valeur de la distance focale principale de l'objectif doit être gravée sur la monture, et l'amateur doit l'exiger de l'opticien.
2. Catalogue de la maison Marco Mendoza.

de la superficie de l'ouverture[1] ou du carré du diamètre de l'ouverture[2].

3° *Chambres noires et châssis.* — L'ancien daguerréotype (fig. 514) est remplacé aujourd'hui par des chambres noires dites *à soufflet*. La partie mobile B est réunie à la partie fixe C au moyen d'un soufflet en carton, recouvert de toile noire, imperméable à la lumière. Une base ou *queue ll*, qui porte l'avant et l'arrière, permet de les rapprocher ou de les éloigner pour effectuer la mise au point. Le tirage devient ainsi plus étendu, tandis que la chambre est elle-même plus légère et plus portative

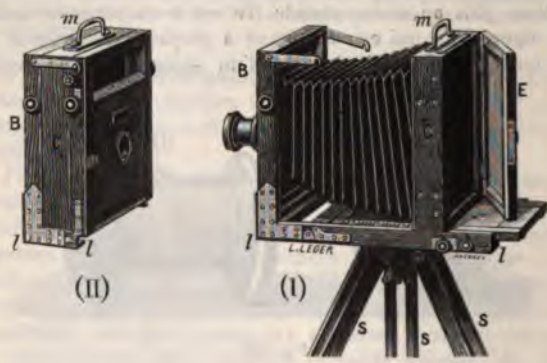


Fig. 519.

La figure 519 (I) représente une chambre à soufflet munie de son objectif O, montée sur son support fixe SS, avec son écran en verre dépoli E à demi ouvert. La partie (II) de la figure représente la même chambre démontée et repliée. On la transporte aisément à la main, en la prenant par la poignée *m*.

La figure 520 représente un appareil de campagne monté sur son support à trois branches, à coulisse, pouvant se replier, de manière à occuper un volume très réduit et très portatif. On voit en G le sac qui sert à transporter la chambre.

4° *Mise au point.* — Elle s'effectue sous un voile noir, et a pour

1. *A condition* que l'ouverture soit circulaire.

2. *Il y a un diaphragme normal*, adopté par le Congrès de Photographie : *c'est celui dont l'ouverture* a un diamètre égal au dixième de la distance focale *principale de l'objectif.*

but d'amener le verre dépoli de l'appareil dans le plan focal qui correspond au maximum de netteté.

5° *Châssis négatifs.* — Les couches sensibles, plaques ou pellicules, ayant été préparées dans l'atelier, à l'obscurité, sont transportées, à l'abri de la lumière, dans la chambre noire, à l'aide d'appareils spéciaux appelés *châssis négatifs* ou simplement *châssis*.

Fig. 520.

Châssis à volets. — Il y en a de plusieurs modèles. Le *châssis à volets* est le plus employé. On le fait toujours double (fig. 521). Les plaques sont séparées par une paroi opaque et maintenues par de petits taquets. Un ressort de pression central applique les plaques contre les taquets et les maintient en position[1]. La figure 521 (I et II) représente un châssis double à volets, ouvert (I) et fermé (II).

1. Les *taquets ont l'inconvénient* de se desserrer par l'usage. Il faut donc les *resserrer de temps en temps.*

Châssis à rideaux. — On construit également des *châssis à rideaux*, où les volets, au lieu d'être rigides, sont souples, étant formés de petites lamelles de bois collées sur étoffe. Le volet, au

Fig. 521.

Fig. 522.

lieu d'être tiré en dehors du châssis, vient donc se loger à la partie supérieure (fig. 522). Ce dispositif intercepte absolument la lumière. Ce châssis se construit simple ou double. La figure 522 représente un châssis à rideaux, ouvert en partie.

Fig. 523.

Châssis à rouleaux. — Enfin, on construit des châssis de forme spéciale, dits *châssis à rouleaux*, pour l'emploi des pellicules sensibles. La figure 523 représente le châssis à rouleaux de M. Marco Mendoza. Cet appareil permet d'employer des papiers ou pellicules libres négatifs ou d'autres substances sensibles en *bobines*. Il est construit de manière à séparer exactement l'une de l'autre les épreuves successivement impressionnées. Un cadran indicateur *c* fonctionne automatiquement, de manière à faire connaître le nombre de clichés impressionnés. Enfin un petit timbre prévient l'opérateur au moment où une nouvelle bande sensible remplace celle qui vient d'être impressionnée.

6° *Pose.* — Après avoir fermé l'objectif, on place dans l'appareil le châssis contenant la couche sensible, on l'ouvre et on laisse agir la lumière pendant un temps variable suivant les conditions de l'opération.

La *détermination du temps de pose* est un des problèmes les plus complexes de la photographie, car la solution dépend de nombreux coefficients : sensibilité de la plaque, ouverture et foyer de l'objectif, distance et coloration du modèle, actinisme de la lumière, lequel dépend lui-même de la latitude, de la saison, de l'heure, de l'état de l'atmosphère, etc.

Dans la pratique, il est toujours recommandé de chercher à *dépasser* le temps normal qui paraît être nécessaire. En effet, on peut toujours, par la conduite du développement, modérer la venue d'une image *surexposée*, tandis qu'en cas de *sous-exposition* l'opérateur le plus habile ne saurait faire apparaître ce que la lumière n'a pas imprimé.

511. Observations générales sur le procédé au gélatino-bromure d'argent. — *Éclairage du laboratoire.* — La préparation des plaques, leur maniement et leur développement ne peuvent s'effectuer qu'à la lumière rouge. Aussi les verres du laboratoire doivent-ils être essayés avec le plus grand soin au spectroscope. Ils ne doivent laisser passer aucune trace de vert ni de jaune.

Nature de la couche sensible. — La gélatine, en tant que support, constitue un réseau dont la finesse ne saurait être comparable à celle de l'albumine ou du collodion ; aussi la finesse de l'image et la transparence sont-elles moins grandes avec le nouveau procédé. De plus, la grosseur du grain de bromure d'argent paraît croître avec la sensibilité, de telle sorte que plus on exalte cette qualité, plus l'image est grenue. Mais ces inconvénients ont peu d'importance à côté des nouvelles études qui ont été la conséquence directe de l'augmentation de sensibilité des préparations photographiques.

512. Tirage des positifs sur papier : épreuves photographiques. — Le cliché étant obtenu, il s'agit de le reproduire sur papier : c'est la seconde opération de la photographie.

Les procédés de tirage des positifs peuvent se diviser en deux grandes classes :

1° Les *procédés photographiques*, dans lesquels l'action de la lumière est nécessaire pour l'obtention de chacune des épreuves. Les principaux sont basés sur l'emploi des sels d'argent, de platine ou de fer ou sur les propriétés particulières de la gélatine bichromatée (procédé au charbon).

2° Les *procédés mécaniques*, dans lesquels la lumière intervient seulement pour faire une planche qui sera tirée ensuite par les procédés ordinaires de la lithographie, de la typographie ou de la taille-douce. Leur classification est faite d'après le caractère même de cette planche.

513. Procédés photographiques : Procédé au chlorure d'argent. — 1° *Préparation du papier sensible.* — On trouve dans le commerce divers papiers préparés spécialement : papier salé, papier albuminé, gélatiné; on les trouve également sensibilisés.

Celui qui est presque exclusivement employé est le papier préparé à l'albumine d'œuf, qui donne des épreuves d'une grande finesse et d'une richesse de tons remarquable.

La feuille est mise à flotter pendant 3 à 5 minutes sur un bain de nitrate d'argent (à 10 ou 15 centièmes). Après quoi on la soulève avec une pince, après avoir eu soin de constater (dès le début de l'opération) qu'il ne s'est pas formé de bulles d'air entre le papier et le bain. Le nitrate d'argent forme du chlorure d'argent impressionnable avec le chlorure de sodium dont le papier est imprégné. On laisse ensuite sécher le papier à l'air et dans l'obscurité.

2° *Tirage.* — Le cliché est placé dans un châssis-presse A (fig. 524).

Fig. 524.

Ce châssis-presse se compose d'un cadre en chêne A, au fond duquel est disposée une glace sans tain très forte, d'une double planchette à charnière P et de deux fermoirs à ressort BB'.

Le cliché est placé sur la glace, la couche en dessus, puis le papier sensibilisé est disposé le côté sensibilisé sur la couche. Sur ce papier on place un matelas de drap ou de papier destiné à donner une pression égale sur toute la surface.

On dispose la planchette à charnière et on ferme le châssis au moyen des ressorts P et P'; grâce à la pression uniformément répartie, le papier se trouve appuyé sur tous les points du cliché. En exposant le châssis à la lumière, on obtiendra une image *positive*, c'est-à-dire où à chaque partie blanche et transparente du cliché correspondra une partie noire, et où, par conséquent, les valeurs de l'image de l'objet photographié seront rétablies.

On regarde de temps en temps si le tirage est assez *venu* en

ouvrant l'un des côtés du châssis. Lorsque l'exposition est suffisante, on retire la feuille et on fait les opérations suivantes.

3° *Lavage des épreuves.* — Les épreuves sont lavées à l'eau ordinaire pendant quelques minutes, afin d'éliminer une partie du nitrate d'argent qu'elles retiennent. Cet excès de nitrate aurait l'inconvénient grave d'occasionner des taches au virage et d'épuiser rapidement le bain.

4° *Virage.* — Le virage a pour objet, d'abord de remplacer l'argent réduit, qui est altérable à l'air, par de l'or qui est inaltérable, et puis de donner aux photographies un ton pourpre très riche et qui est variable dans certaines limites. Le bain de virage se compose d'une solution de chlorure d'or (à 1 millième), à laquelle on ajoute une proportion variable de sels alcalins, tels que les borate, acétate, carbonate de soude, etc.

Il est utile de remuer constamment les épreuves dans le bain.

5° *Fixage.* — Le fixage s'opère en laissant les épreuves pendant 10 à 15 minutes dans un bain d'hyposulfite de soude (à 10 ou 15 centièmes) qui dissout le chlorure d'argent non réduit par la lumière dans l'exposition photographique; puis on lave les épreuves.

Remarque. — Ce lavage est une opération *essentielle* pour la conservation des épreuves. S'il restait en effet quelques traces d'hyposulfite dans l'épreuve, au bout d'un certain temps d'exposition à l'air humide il se dégagerait de l'acide sulfhydrique, qui donnerait, avec l'argent de l'image, un sulfure d'argent, lequel se transformerait lentement en sulfate, qui, bien que peu soluble, se dissoudrait peu à peu et finirait par disparaître.

Autrefois on lavait à deux ou trois eaux; aujourd'hui on lave à l'eau courante pendant plusieurs heures.

514. **Autres procédés photographiques.** — 1° *Procédé aux sels de platine.* — Ce procédé est fondé sur la propriété que possède un mélange sec de chlorure de platine et d'oxalate de fer de se réduire à la lumière, en donnant une image noire produite par le platine réduit. On la développe dans un bain chaud d'oxalate de potasse, puis on la fixe dans une solution étendue d'acide chlorhydrique.

Ce nouveau procédé permet d'obtenir des épreuves positives entièrement inaltérables et d'une valeur artistique plus grande que les précédentes. Il permet en outre d'obtenir indifféremment des clichés sur papier, sur bois, sur étoffe, sur ivoire, etc.

2° *Procédé aux sels de fer.* — Il a pour base l'action de la lumière sur les sels ferriques et l'action du ferrocyanure de potassium. Suivant le mode opératoire, on obtient des images *bleues* sur fond *blanc*, ou *blanches* sur fond *bleu*. Ces procédés sont surtout employés dans l'industrie pour la reproduction directe des plans dessinés sur toile ou papier transparent. Par l'action de l'acide gallique, on peut obtenir des épreuves *noires* sur fond *blanc* (Colas).

3° *Procédé au charbon.* — Ce procédé donne des images très artistiques et d'une très grande stabilité. Il a été indiqué par Poitevin, à qui l'on doit, du reste, la

découverte de la plupart des propriétés de la gélatine bichromatée. Le principe sur lequel il repose est le suivant. La gélatine bichromatée, sous l'influence de la lumière, devient insoluble, dans l'épaisseur de la couche, proportionnellement à l'intensité de la lumière qui l'a pénétrée. Si, dans cette gélatine bichromatée coulée sur papier, on a incorporé au préalable une matière colorante stable à l'état de poudre finement divisée, les parties devenues insolubles emprisonneront la matière colorante, proportionnellement à l'action de la lumière qui a traversé le négatif, tandis que les parties restées solubles seront éliminées par un dissolvant approprié (eau chaude). L'image sera donc constituée par des épaisseurs plus ou moins fortes de gélatine colorée.

515. **Procédés mécaniques.** — 1° *Impression sur surface continue : Photolithographie* et *photocollographie.* — Une surface unie (pierre, zinc) est recouverte d'une substance sensible à la lumière (bitume de Judée, gélatine ou albumine bichromatées), puis exposée sous le négatif[1]. Après insolation, les parties non insolées sont dissoutes dans les dissolvants appropriés, puis la surface est encrée comme dans les procédés lithographiques. La photographie n'intervient ici que pour donner sur la surface lithographique le dessin avec la plus entière précision : c'est la *photolithographie.*

Dans la *photocollographie*, une couche de gélatine bichromatée, étendue sur une glace ou un support rigide, est insolée sous le négatif, puis lavée abondamment de façon à éliminer tout le bichromate. Sous l'influence de la lumière, l'insolubilisation de la couche est proportionnelle aux valeurs du négatif.

Dans ces conditions, si l'on vient à encrer la planche, préalablement mouillée, l'encre grasse ne prendra que sur les parties insolées, et proportionnellement à leur degré d'insolation, tandis qu'elle sera chassée dans les autres. On appliquera une feuille de papier, et l'on tirera à la presse. Ce procédé est l'un des plus parfaits que l'on ait indiqués, car il permet de reproduire avec la plus grande perfection les négatifs à teintes modelées.

2° *Impression sur surfaces discontinues.* — Ici nous aurons à distinguer les procédés donnant des planches en relief ou en creux.

Planches en relief. — On obtient sur zinc, le plus généralement, et au moyen du bitume de Judée ou de la gélatine bichromatée, une réserve qui reproduit le dessin à exécuter (ce procédé ne s'applique qu'aux reproductions de trait). On attaque alors le métal au moyen d'un dissolvant, de façon à obtenir le dessin en relief.

On dissout alors la réserve, et l'on encre la plaque montée sur un bloc typographique et susceptible alors d'être intercalée dans le texte d'un ouvrage imprimé.

Pour obtenir par ce procédé la reproduction des sujets d'après nature, qui sont à *modèles continus*, on transforme ceux-ci en négatifs n'ayant que des noirs et des blancs, par l'interposition de trames formées de lignes ou de points, de façon à transformer les demi-teintes en lignes discontinues. — On peut alors tirer typographiquement un semblable négatif. Ce procédé, qui sera certainement perfectionné, prendra une place importante dans l'illustration, en permettant d'intercaler dans le texte le document photographique lui-même.

Planches en creux. — Il s'agit d'obtenir des planches en creux analogues à celles qu'obtient le graveur à l'eau-forte. On opère en général sur cuivre, et l'on reporte sur celui-ci l'image photographique. Une fois la réserve faite, on creuse au moyen d'un acide plus ou moins dilué. Le tirage se fait par les *imprimeurs en taille-douce.*

Un autre procédé consiste à obtenir, sur gélatine bichromatée, un relief que l'on moule par les procédés galvanoplastiques.

1. Ce procédé ne peut s'appliquer à la reproduction des négatifs à teintes modelées : ils ne doivent être composés que de noirs et de blancs.

Photoglyptie (procédé Woodbury). — Ce procédé, absolument différent des précédents, consiste à obtenir, d'après un relief en gélatine produit sous le négatif, un moule en plomb dans lequel on coule de la gélatine colorée. On superpose une feuille de papier, et on laisse la gélatine faire prise, après avoir exercé une bonne pression au moyen d'une presse spéciale. L'encre est chassée dans les parties planes qui correspondent aux blancs, elle reste en plus ou moins grande quantité dans les creux, suivant leurs profondeurs, et elle reproduit ainsi toutes les valeurs de l'original.

Ce procédé très intéressant, et qui donne des images de teintes variées, n'est plus guère employé, car il ne permet pas de tirer avec marges, et nécessite le collage de chaque épreuve, tout comme dans le procédé ordinaire au chlorure d'argent.

516. Photographie instantanée. — On peut comprendre dans la photographie instantanée toutes les applications dans lesquelles la durée de pose est réduite *à un instant*, c'est-à-dire à une fraction de seconde extrêmement petite, soit par l'emploi d'un organe spécial qu'on nomme l'*obturateur*, soit par ce fait que la plaque enregistre un phénomène qui est par lui-même *instantané*.

Pour obtenir, dans ces circonstances, des images satisfaisantes, il sera nécessaire de combiner les diverses conditions de l'expérience : sensibilité de la couche photographique, rapidité de l'objectif (caractérisée par son foyer et son ouverture), éclairage du modèle, énergie du développement.

I. *Obturateurs.* — On appelle *obturateurs* des appareils ayant pour objet de ne laisser entrer la lumière que pendant un temps très court, qui doit être toujours le même pour un même degré de réglage. Le nombre des obturateurs est considérable. On peut les classer en trois classes :

1° L'*obturateur à volet* (simple ou double) est constitué par un ou plusieurs volets. Ceux-ci peuvent être indépendants ou solidaires l'un de l'autre (exemple : type Guerry, fig. 525).

2° L'*obturateur latéral*, qui se compose de lamelles percées d'ouvertures rectangulaires ou en secteur passant rapidement devant l'objectif d'un mouvement rectiligne ou circulaire (types : obturateur guillotine; obturateur Londe et Dessoudeix).

La figure 526 représente l'un des types d'*obturateurs Londe et Dessoudeix*. Il est entièrement en métal et se place entre les deux lentilles de l'objectif, ce qui réduit beaucoup son volume. L'obturateur proprement dit O a une forme ovoïde. Il est muni de deux manettes : une petite, *m*, qui sert à armer le disque d'obturation, et une plus grande, M, qui sert à tendre plus ou moins le ressort entraînant le disque, et par suite à donner différentes vitesses de passage. Cette manette se meut sur une demi-couronne portant une série d'encoches numérotées 1, 2, 3, 4, 5, 6.

L'une des encoches porte l'inscription *pose* : c'est la position dans laquelle il faut mettre la manette lorsqu'on veut effectuer la mise au point ou une pose d'une certaine durée; car l'obturateur est *mixte*, c'est-à-dire qu'il permet de faire des poses instantanées ou des poses d'une durée quelconque. On *arme* l'obturateur en mettant la manette à l'un des crans numérotés : la vitesse est d'autant plus grande que le numéro est plus élevé ; on a 1/15 de seconde au n° 1, et 1/120 au n° 6.

Quelquefois ce genre d'obturateur comporte deux lamelles allant en sens inverse (type *Thury et Amey*).

3° *Obturateur central.* — Cet obturateur est formé de lamelles qui constituent une ouverture presque circulaire, régulièrement croissante et décroissante, tout à fait analogue au diaphragme-iris (type Dallmeyer).

Remarque générale. — Ces divers genres d'obturateurs, d'après leur mode de construction, se placent soit en avant, soit en arrière de l'objectif, soit même dans un plan aussi voisin que possible des diaphragmes.

Ils sont commandés généralement au moyen d'un déclenchement pneumatique, lequel fonctionne par la pression d'une poire en caoutchouc (fig. 525 et 526).

Fig. 525.

Fig. 526.

4° *Obturateur à rideau.* — Un dernier type d'obturateur consiste en un rideau ou un écran percé d'une fente étroite que l'on fait fonctionner contre la plaque elle-même. (C'est un obturateur de ce genre qui a été employé par M. Janssen pour la photographie du soleil, et par M. Marey pour l'étude du mouvement.) C'est celui qui permet d'obtenir les durées d'exposition les plus courtes.

II. *Applications de la photographie instantanée.* — Elle permet de reproduire avec succès les sujets en mouvement les plus variés : personnages, animaux, phénomènes naturels, vagues, cascades, nuages, etc. Il n'est même plus nécessaire que l'appareil photographique soit installé sur un pied solide, comme autrefois; on opère à la main avec grande perfection. L'opérateur lui-même peut être en mouvement et réussir étant sur un bateau, en voiture, dans un train, en ballon.

517. **Photochronographie.** — Si les épreuves instantanées simples ont un intérêt artistique, ou documentaire, ou scientifique, elles n'en sont pas moins souvent incomplètes, car il est impossible de saisir dans son ensemble le mouvement que l'on veut étudier, et une épreuve unique ne donne qu'une phase de ce mouvement prise au hasard. La *méthode photochronographique* a pour objet de prendre des photographies successives, à des intervalles réguliers, de manière à faire l'analyse rigoureuse d'un mouvement quel qu'il soit.

1° *Expériences de Muybridge.* — Elle a été appliquée pour la première fois en Amérique par M. Muybridge, qui a étudié les différentes allures des animaux, et principalement du cheval : celui-ci a été reproduit au pas, au petit trot, au

grand trot et au galop, à une vitesse de 1142 mètres par minute. Des expériences ont été faites également sur un trotteur attelé à un tilbury. La vitesse était de 715 mètres par minute.

2° *Expériences de M. Marey.* — M. Marey, dans les divers appareils qu'il a imaginés (depuis 1883 jusqu'en 1893), s'est attaché à obtenir des images prises à des intervalles de temps rigoureusement égaux, ce qui était un progrès sur la méthode de Muybridge. Les résultats obtenus sont d'une extrême précision et la trajectoire d'un objet en mouvement peut être relevée dans l'espace en fonction du temps.

Pour enregistrer le temps qui s'est écoulé entre la prise de deux épreuves successives, on place sur le même fond noir que le modèle un cadran portant des divisions et une aiguille blanche qui fait un tour à la seconde. A chaque photographie l'aiguille sera reproduite et le temps sera mesuré par l'angle existant entre chacune des images successives de l'aiguille.

Les études de M. Marey ont porté sur la marche, le saut, la course, sur les différentes allures du cheval, le vol des oiseaux, la nage des poissons, etc. Il a même appliqué sa méthode à l'étude des infiniment petits que l'on ne peut examiner qu'au microscope, et à l'enregistrement de phénomènes physiologiques variés : marche du sang dans les vaisseaux, mouvements du cœur, et, tout récemment, à l'étude des mouvements vibratoires des liquides, etc.

Fig. 527.

3° *Expériences de M. Anschutz.* — En Allemagne, M. Anschutz est arrivé également à de très beaux résultats avec un dispositif analogue à celui de Muybridge, mais fonctionnant électriquement à des intervalles de temps rigoureusement égaux, avec des obturateurs à rideaux.

4° *Expériences de M. Sebert, de M. Londe.* — En France, et au moyen d'appareils spéciaux, M. le général Sebert a étudié différentes questions intéressant la balistique (lancement de torpilles, etc.), et M. A. Londe les problèmes photochronographiques concernant la photographie médicale.

5° *Synthèse du mouvement.* — L'analyse du mouvement est désormais un fait acquis et l'on a cherché aussitôt à en effectuer la synthèse en utilisant les vues photochronographiques au moyen du zootrope, du phénakisticope et autres appareils *analogues. Les résultats* obtenus par MM. Marey, Demeny, Anschutz *sont des plus remarquables.*

518. Autres résultats obtenus par l'emploi des poses très courtes. — Outre la reproduction des phénomènes qui échappent à l'œil à cause de leur rapidité,

Fig. 528.

la photographie instantanée permet d'enregistrer, grâce à des poses très courtes, des détails que l'on ne saurait percevoir autrement.

1° *Expériences de M. Janssen.* — C'est en réduisant la pose à $\frac{1}{2000}$ de seconde que M. Janssen est arrivé à reproduire différents détails de la surface solaire intéressant la structure du noyau et la pénombre, les facules, les rides, les taches de la photosphère, etc.

2° *Expériences de M. Angot.* — De même, M. Angot a pu obtenir les plus fins

Fig. 529.

détails de certaines masses nuageuses très légères qui se confondent avec le bleu du ciel.

3° *Photographie des éclairs et des étincelles électriques. — Expériences de M. Trouvelot.* — Les résultats atteints dans ces cas particuliers ont été très féconds au point de vue de la forme et de la durée de ces manifestations électriques. C'est ainsi que l'éclair n'affecte jamais la forme en zigzag sous laquelle on l'a toujours représenté, et que sa durée n'est pas aussi courte qu'on le croyait (fig. 527).

Quant à la forme de l'étincelle électrique (fig. 528), elle a été indiquée avec une perfection complète par M. Trouvelot.

Fig. 530.

519. **Agrandissements photographiques.** — On a souvent besoin, en photographie, d'agrandir des clichés. Dans ce cas, il existe deux modes d'agrandissement distincts.

1° On commence par préparer un cliché positif sur verre du négatif qu'on veut agrandir. On opère soit directement par *contact*, soit dans une chambre noire par *transparence*. C'est avec ce nouveau cliché *positif* qu'on obtient par *transparence* (fig. 529) dans la chambre noire un cliché *agrandi* et *négatif*. C'est de ce dernier que l'on se sert pour le tirage des épreuves.

2° Dans certains cas il *est préférable*, tant au point de vue de la netteté que de

la rapidité, de se servir du papier préparé au gélatino-bromure. L'image agrandie du cliché négatif est projetée au moyen de la lumière solaire ou artificielle sur un écran où est disposé le papier sensible. On développe comme d'ordinaire, et on obtient ainsi des agrandissements fort beaux.

520. **Photographie à la lumière artificielle.** — Grâce aux progrès réalisés dans la sensibilité des préparations photographiques, on peut maintenant opérer très facilement avec des sources de lumière artificielle, lumière électrique, magnésium, etc.

Ce dernier, employé à l'état de poudre impalpable, seul ou avec des substances oxydantes (fig. 530), et projeté dans une flamme, donne des éclairs d'une intensité considérable, ce qui a permis d'opérer dans les endroits mal éclairés, ou qui sont dans l'obscurité complète : intérieurs d'appartements, théâtres, grottes, cavernes, etc.

521. **Dégradés photographiques.** — Certaines photographies sur fond blanc acquièrent une plus grande valeur artistique au moyen du *dégradé*, qui a pour effet de rapprocher davantage la photographie de la gravure ou du dessin au crayon. On arrive facilement à ce résultat en disposant au-dessus de la glace du châssis contenant le cliché un dégradateur (fig. 531, I, II), c'est-à-dire un verre sur lequel sont collées des feuilles transparentes de papier découpées à dentures. La lumière tamisée par ce dégradateur passe insensiblement du blanc au noir, et donne un fond blanc, car toute la partie du dégradateur est noire et imperméable à la lumière.

(I) (II)

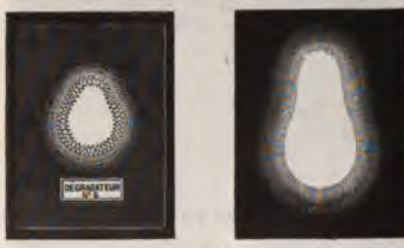


Fig. 531.

On se sert encore de verres jaunes dégradés.

522. **Photographie micrographique.** — C'est une branche nouvelle de la photographie, qui comprend les deux problèmes suivants :

1° Fixer, au moyen des procédés photographiques ordinaires, les images *agrandies* des objets microscopiques (*photomicrographie*).

2° Obtenir des images microscopiques d'objets de grandeur ordinaire, de manière à réunir un très grand nombre d'épreuves dans un petit espace.

1° *Photomicrographie.* — L'ensemble des procédés et des appareils qui résolvent la première question constitue la *photomicrographie*. Le dispositif le plus simple est dû à M. Girard. On substitue un microscope à l'objectif ordinaire d'une chambre noire (fig. 532)[1] et, au moyen du miroir, on éclaire fortement le

1. On sait que dans ces conditions le microscope ordinaire peut donner des *images réelles* agrandies, et droites par rapport à l'objet.

petit objet, dont l'image *grossie* va se projeter sur l'écran de la chambre noire

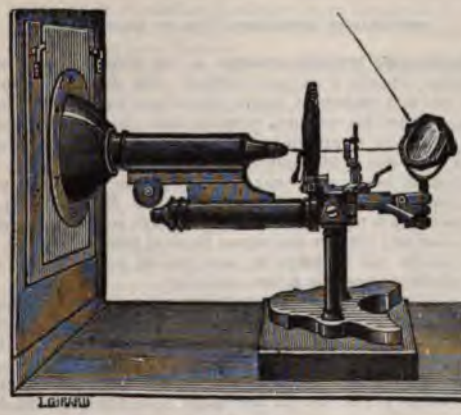


Fig. 532.

et s'imprimer sur la plaque sensibilisée. La suite des opérations photographiques s'effectue comme d'habitude. Ce procédé s'applique à toutes les recherches micrographiques : il permet d'en fixer les découvertes et de les étudier d'une manière permanente.

2° *Épreuves microscopiques.*— La deuxième question a été résolue d'abord par les procédés et les appareils de M. Bertsch, complétés ensuite et perfectionnés par MM. Neyt, Dagron, Moitessier et J. Girard. C'est ainsi qu'on est parvenu à faire ces imperceptibles photographies qu'on enchâsse dans une monture quelconque, et qui, vues à la loupe, prennent les dimensions des épreuves ordinaires.

Fig. 533.

C'est par ces procédés que, pendant le siège de Paris, on a pu expédier en province de longues et volumineuses dépêches réduites à une surface microscopique et à un poids minuscule. M. Dagron employait de minces pellicules de collodion, assez sensibles pour n'exiger que *deux secondes* de pose. Sur chacune d'elles on pouvait photographier 12 à 16 pages in-folio, contenant en moyenne 3000 dépêches; 18 de ces feuilles, introduites dans un tuyau de plume, pesaient environ 1 demi-gramme, et constituaient la charge d'un pigeon voyageur. La figure 533 est le fac-similé de l'une de ces dépêches. Arrivées à destination, elles étaient

agrandies et projetées sur un écran blanc à l'aide d'un microscope photo-électrique.

PHOTOGRAPHIE ORTHOCHROMATIQUE ET HÉLIOCHROMIE.

523. **La photographie orthochromatique. — Les plaques isochromatiques.** — La photographie actuelle a un grave défaut : elle donne des images où les *valeurs* sont très mal rendues et même, en quelque sorte, renversées : le *bleu*, qui est la plus sombre des couleurs, vient en *blanc;* le *jaune*, le *vert*, le *rouge*, viennent en *noir*. Il en résulte que, dans un positif photographique ordinaire, on ne voit en *clair* que le *bleu* qui vient en *blanc* et que le *blanc* (parce que le blanc contient du bleu); quant aux autres couleurs, elles ne viennent qu'en raison de la proportion de bleu qu'elles contiennent. Et la cause de cette anomalie est inhérente à la nature même des substances sensibles. La plaque photographique étant très sensible aux rayons bleus et très peu sensible aux autres rayons, il en résulte que le temps de pose, qui est suffisant pour le bleu, se trouve être insuffisant pour les autres couleurs [1].

La première méthode qui ait été proposée pour corriger cette imperfection, c'est l'emploi des plaques dites *isochromatiques*. On appelle ainsi des plaques dont la substance sensible a été additionnée de certaines substances tinctoriales qui en accroissent la sensibilité pour telle ou telle radiation colorée, et principalement pour les radiations les moins actives. MM. Attout-Tailfer et J. Clayton furent les premiers praticiens qui fabriquèrent industriellement des plaques isochromatiques et les introduisirent dans la pratique. C'étaient des plaques au gélatino-bromure, sensibilisées à l'*éosine* pour le *vert-jaune*. On prépare également des plaques isochromatiques au collodion humide et au collodion sec. On les sensibilise à l'aide d'un grand nombre de substances. Nous citerons, pour exemple, la *cyanine*, qui sensibilise pour le *rouge* et *l'orangé*; l'*érythrosine*, pour le *jaune*; la *salicine*, pour le *vert* et le *rouge*.

524. **Photographie orthochromatique : La méthode de M. Lippmann.** — Mais ces plaques sont encore bien loin de la plaque isochromatique idéale, c'est-à-dire de celle qui aurait une sensibilité chromatique *égale à celle* de la rétine; elle seule pourrait rendre en valeurs justes les tons des objets photographiés. En attendant qu'on puisse la réaliser, on peut tirer un parti bien supérieur des plaques existantes, grâce à une méthode de M. Lippmann, qui consiste essentiellement dans l'emploi rationnel et systématique d'une série de verres colorés.

Après avoir mis dans la chambre noire une plaque Attout-Tailfer, on place une *glace bleue* devant l'objectif et on laisse poser le peu de temps nécessaire pour que les rayons *bleus* de l'image impressionnent la plaque. — Ensuite, sans toucher à l'appareil et en prenant bien soin de ne pas le déplacer, on substitue à la glace bleue une *glace verte* [2], et l'on continue à faire poser assez longtemps pour que le *vert*, à son tour, impressionne la plaque fortement. — Enfin, c'est le tour des rayons rouges. On les fait agir en substituant devant l'objectif une *glace rouge* à la glace verte.

Le résultat final de cette méthode « de triple pose », c'est de donner des photographies orthochromatiques, c'est-à-dire *claires* sans *taches brunes*, dans lesquelles les feuillages *verts*, les draperies *jaunes*, etc., au lieu de donner des tons bruns, sont rendus par un dessin finement modelé, comme dans une gravure bien faite.

525. **Photographie des couleurs.** — 1° *Énoncé du problème.* — On sait que

1. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences :* Sur l'obtention de la photographie en valeurs justes, par M. G. Lippmann.

2. D'un vert très pur, et sans aucune trace de bleu.

l'image des objets éclairés, projetée par l'objectif sur le verre dépoli de la chambre noire, est la reproduction exacte de la forme et de la couleur de ces objets. Or l'épreuve photographique ne reproduit que la forme et le modelé de cette image : la couleur a disparu.

Le problème de la *photographie des couleurs*, ou *héliochromie*, consiste à reproduire la couleur, aussi bien que le modelé, de l'image projetée.

2° *Historique de la solution. — Expériences de M. Becquerel.* — Toutes les fois que les physiciens veulent opérer sur la lumière colorée dans des conditions simples et bien définies, c'est le spectre solaire qu'ils emploient, car lui seul est formé de rayons simples : toutes les autres lumières colorées sont des mélanges de ces rayons simples. Vers 1848, M. Edmond Becquerel obtint pour la première fois une image fidèle du spectre solaire. Il eut l'idée de prendre une lame de *plaqué d'argent*, préparée d'une manière spéciale. Au lieu de la sensibiliser par l'iode, — comme faisait Daguerre, — il employa le chlore. Cette surface, convertie ainsi en chlorure *violet* d'argent, puis exposée aux couleurs d'un spectre solaire pendant un temps suffisant, prit directement la couleur de ces rayons. Mais cette image colorée ne pouvait être conservée que dans l'obscurité. Exposée au jour, elle devenait blanche en son entier. Le problème n'était pas résolu.

Expériences de Poitevin. — Après Becquerel, Poitevin reprit le même procédé, avec des modifications secondaires. Au lieu de déposer le sous-chlorure violet sur une plaque d'argent, il le déposait sur papier; de plus il l'imbibait de bichromate de potasse, ce qui en augmentait la sensibilité. Mais, pas plus que Becquerel, Poitevin ne parvint à fixer les images colorées.

Expériences de Charles Cros et de Ducos de Hauron. — A la suite de ces expériences on paraît avoir renoncé, pendant plus de vingt ans, à résoudre le problème directement.

En 1869, Ch. Cros et M. Ducos de Hauron imaginèrent séparément une méthode indirecte pour obtenir des images *colorées photographiques*. En principe, l'un et l'autre inventeur procédaient de la même manière.

Ils tiraient d'abord, de l'objet à reproduire, trois clichés incolores; ensuite, à l'aide de procédés connus, ils tiraient de ces trois clichés négatifs trois épreuves positives qu'ils teintaient séparément de trois couleurs différentes, obtenues par exemple avec trois encres grasses colorées. En superposant ensuite ces trois images qui sont monochromes, on réalisait une image polychrome, reproduisant sensiblement les teintes et les tons divers de l'objet coloré.

Ce procédé était analogue à la chromolithographie, avec cette différence qu'il supprimait l'intervention des dessinateurs en les remplaçant par la photographie. Par contre, ce procédé ne résolvait nullement le problème, puisqu'il ne fournissait directement que des clichés incolores. La couleur n'était apportée qu'après coup, et le choix en était plus ou moins arbitraire, étant subordonné à la qualité des encres grasses employées.

526. **Photographie des couleurs : Découverte de M. G. Lippmann.** — 1° *Dispositif expérimental.* — M. Lippmann est arrivé récemment à une solution complète et définitive du problème de la photographie des couleurs, à l'aide d'une méthode simple et rationnelle, totalement différente des procédés empiriques de ses prédécesseurs.

Il est parti de la théorie de la lumière pour définir *à priori* les conditions dans lesquelles il faut se placer pour obtenir des clichés colorés, par l'application directe des procédés photographiques ordinaires. Ces conditions sont au nombre de deux :

1° Il faut que la couche sensible soit *continue*, et non pas formée, comme les émulsions ordinaires, de petits grains métalliques dispersés dans la couche de gélatine;

2° Il faut que cette couche sensible soit adossée à une surface réfléchissante formant miroir.

M. Lippmann réalise la première condition en sensibilisant dans un bain d'azotate d'argent une couche soit de collodion, soit d'albumine, soit de gélatine, imprégnée de bromure, ou de chlorure, ou d'iodure de potassium. Il réalise la surface miroitante *adossée* à la couche sensible en plaçant derrière celle-ci, et en contact avec elle, une couche de mercure.

Il a imaginé pour cela un châssis spécial (fig. 534) en forme d'auge plate

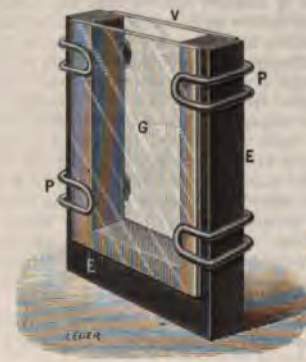


Fig. 534

Fig. 535.

EEGV. Elle est constituée très simplement, d'abord par la plaque sensible, dont la face nue G est tournée vers l'objectif, puis par une contre-lame de verre ordinaire V, qui forment les deux faces opposées; elles sont réunies à l'aide de

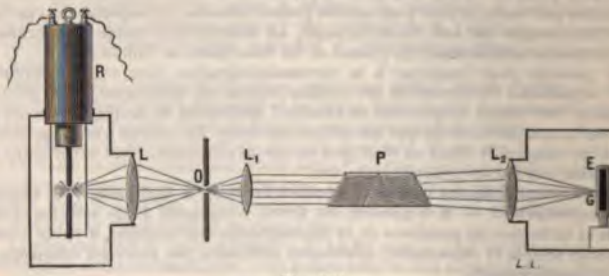


Fig. 536.

pinces de serrage en laiton PP, par l'intermédiaire d'un cadre d'ébonite EEE, formant les parois. C'est dans cette auge, parfaitement étanche, qu'on verse le mercure servant de miroir.

Le châssis ainsi préparé est exposé en E par sa face G à l'action directe d'un *spectre solaire*, provenant d'un arc voltaïque (fig. 535). En R est le régulateur, en L, L_1 et L_2 des lentilles destinées à concentrer la lumière solaire, qui a *pénétré par la fente* O d'un écran, sur un prisme à vision directe (fig. 536)

P, qui disperse la lumière sans la dévier, et qui projette un spectre pur en G.

Lorsque la pose est terminée, on vide la cuve, puis on enlève la plaque sensible qui n'était maintenue que par pression contre les parois[1]. On la développe alors et on la fixe par les procédés ordinaires (par exemple à l'acide pyrogallique et au carbonate d'ammoniaque, puis à l'hyposulfite de soude). On voit apparaître les couleurs du spectre sur la plaque, au fur et à mesure qu'elle se dessèche. On les voit bien par réflexion, en disposant le cliché sur un fond noir et en le regardant à la lumière diffuse.

Ces couleurs sont parfaitement fixées, et absolument inaltérables à la lumière.

2° *Théorie de la méthode Lippmann*[2]. — Les couleurs ainsi obtenues sur la plaque sont très brillantes. De quelle nature sont-elles?

Le dépôt qui résulte de l'action photographique se compose d'*argent réduit*, comme sur un cliché ordinaire, car il a été produit à l'aide des réactifs usuels. Il n'est donc pas *coloré par lui-même*. La couleur est due à une raison purement physique. Ce dépôt d'argent, produit par les actions combinées de la lumière directe et de la lumière réfléchie sur le miroir, a pris une structure lamellaire, d'où résulte dans son épaisseur, *par interférence*, le phénomène de coloration dit des *lames minces* ou des *anneaux colorés*.

Nous avons vu que la couleur prise par une lame mince dépend de son épaisseur : au fur et à mesure que celle-ci diminue, on observe, par réflexion, successivement du rouge, puis du vert, du bleu et du violet. La couleur réfléchie sur une lame mince est celle dont la demi-longueur d'onde est égale à l'épaisseur de la lame. Or la lumière qui a impressionné la couche sensible, pendant la durée de l'exposition dans la chambre noire, s'est stratifiée dans son épaisseur, par suite de la présence du miroir de mercure. Chaque onde lumineuse étant réfléchie sur elle-même par ce miroir, il y a eu interférence entre l'onde directe et l'onde réfléchie. Les ondes ont ajouté leurs actions dans certains plans, où il s'est produit des maxima lumineux : c'est là que se sont déposées ensuite les couches d'argent réduit.

En d'autres plans intermédiaires les actions des ondes lumineuses se retranchent au contraire et s'annulent : en tous ces points l'effet photographique a été nul, et il n'y est resté, après le développement et le fixage, que de la gélatine pure.

En résumé, l'action photographique n'a fait que fixer, en la matérialisant par un dépôt d'argent, la position de chaque maximum d'action lumineuse. Or ces maxima sont séparés par des distances égales à une demi-longueur d'ondulation de chaque lumière, et c'est pourquoi les lames minces employées ont précisément cette épaisseur. La vibration lumineuse s'est, en quelque sorte, moulée, par voie photographique, dans l'épaisseur de la plaque impressionnée[3].

Le dépôt d'argent réduit est donc stratifié comme le faisceau lumineux qui lui

1. Cette manipulation est facilitée par un perfectionnement récemment apporté à la cuve de M. Lippmann par MM. Lumière. La cuve elle-même V est encastrée dans un véritable châssis en bois EE dont les deux parois sont maintenues en place (fig. 535) à l'aide d'un ressort métallique R. La paroi postérieure du châssis porte sur ses bords une autre garniture de caoutchouc souple HH formant joint. La face antérieure G présente une feuillure BB, garnie également d'un caoutchouc contre laquelle on applique la plaque sensible G. Un tube adducteur pénètre à travers le châssis dans la partie inférieure de la cuve M, et communique avec une poire en caoutchouc N contenant du mercure. En comprimant ou décomprimant la poire, on peut remplir ou vider de mercure la cuve à volonté et aisément.

2. Voir la *Science Moderne* du 3 mars 1891 : *Conférence faite par M. G. Lippmann au Conservatoire des Arts et Métiers.*

3. On peut rapprocher cette théorie de celle du phonographe. Le son, en effet

a donné naissance. Il se compose d'une série de lames minces d'argent équidistantes, et qui partagent l'albumine ou la gélatine qui leur sert de support en lames minces superposées. D'après la théorie même des anneaux colorés, là où nous voyons du *rouge*, c'est que la distance entre deux couches d'argent successives est égale à une demi-longueur d'ondulation du *rouge*; et plus loin, si nous apercevons du *vert*, c'est qu'en cet endroit la stratification est plus serrée et que la distance des couches d'argent consécutives n'est plus égale qu'à une demi-longueur d'ondulation verte. Et il en est de même pour toutes les autres parties du spectre.

Quant à l'éclat des couleurs observées dans les spectres photographiés de M. Lippmann, il est dû au nombre considérable des lames minces superposées dans chaque région, et dont les effets s'ajoutent. On peut se faire une idée approximative du nombre de strates qui seraient produites dans une couche de gélatine de 1/10 de mm d'épaisseur, environ l'épaisseur d'une feuille de papier ordinaire. En effet, comme on a approximativement

pour le rouge . . . . . $\frac{\lambda}{2} = \frac{1}{5500}$ de mm

pour le jaune. . . . . $\frac{\lambda}{2} = \frac{1}{4000}$ —

pour le violet. . . . . $\frac{\lambda}{2} = \frac{1}{5000}$ —

le rouge du spectre sera produit par 550 lames minces superposées, le jaune par 400 et le violet par 500.

527. **Vérification expérimentale de la théorie.** — *Derniers résultats.* — Il résulte immédiatement de cette théorie de M. Lippmann que les *couleurs composées* des objets colorés doivent *venir* en photographie, par son procédé, aussi bien que les couleurs simples du spectre. Cette conséquence a été vérifiée par l'expérience. Après les épreuves colorées du spectre, M. Lippmann a obtenu des épreuves parfaitement nettes d'objets colorés de couleurs complexes quelconques : un bouquet formé d'un pavot rouge entouré d'oranges jaunes, un perroquet-ara (empaillé, bien entendu, la pose étant encore trop longue pour qu'on puisse photographier un oiseau vivant), une branche de houx avec son feuillage vert et ses baies rouges, un fragment de vitrail à quatre teintes (rouge, vert, jaune et bleu). Enfin, dans ces derniers temps, MM. Lumière et Lippmann lui-même ont obtenu des photographies de paysages, d'une surprenante vérité. Ces paysages ont été pris, au soleil, avec une durée de pose qui a varié de une demi-heure à trois quarts d'heure.

est constitué par des vibrations qui se moulent dans la couche de cire phonographique, en y laissant une trace permanente qui est capable de les reproduire après coup. De même, dans le procédé Lippmann, les vibrations lumineuses se moulent dans la couche sensible en y laissant un dépôt photographique permanent, capable de reproduire après coup les vibrations lumineuses.

LIVRE VIII

CHALEUR

CHAPITRE PREMIER

EFFETS GÉNÉRAUX. — THERMOMÉTRIE.

528. Définition et origine de la chaleur. — Hypothèse des ondulations. — La *chaleur* est, avant tout, la cause de nos sensations de *chaud* et de *froid*; mais cette cause a des effets plus variés et plus puissants, par lesquels on peut aussi la définir : c'est elle qui fait fondre les corps solides et bouillir les liquides, qui fait dilater tous les corps, et qui rend les métaux et certains autres corps incandescents.

De nombreuses hypothèses ont été émises sur l'origine de la chaleur; mais deux systèmes principaux, — les mêmes que pour la *lumière*, — ont été soutenus par les physiciens : le système de l'*émission* et celui des *ondulations*.

Dans le premier, on attribuait les phénomènes calorifiques à un fluide matériel, impondérable, incoercible, qu'on nommait *calorique*. Les atomes du calorique, étant dans un état constant de répulsion, seraient projetés dans toutes les directions et à toutes les distances, s'emmagasineraient en quantité variable dans les corps, et s'opposeraient au contact immédiat de leurs molécules. L'hypothèse de la matérialité de la chaleur fut adoptée par les savants les plus illustres, tels que Newton, Lavoisier, Laplace, Gay-Lussac.

Elle est abandonnée aujourd'hui par tous les physiciens et remplacée par l'hypothèse des *ondulations*. Les dernières molécules des corps seraient animées d'un mouvement vibratoire de très faible amplitude, mais très rapide, *d'où résulterait la chaleur*; ce mouvement serait transmis à distance par l'intermédiaire d'un milieu infiniment élastique, l'*éther*, le même dont les phénomènes lumineux nous ont démontré l'existence.

La chaleur et la lumière seraient donc dues à une seule et même cause : les vibrations des molécules des corps, transmises par l'éther. Il n'y aurait entre les vibrations qui produisent la chaleur et celles qui produisent la lumière qu'une différence dans leur vitesse : c'est la même différence qui existe, en Acoustique, entre les vibrations qui produisent les sons graves et celles qui produisent les sons aigus [1].

1. Tout en admettant l'immatérialité de la chaleur, on a conservé le langage usité dans la théorie de l'émission, et l'on dit encore, d'un corps qui s'échauffe ou se refroidit, qu'il *gagne* ou *perd* de la chaleur; mais en réalité on doit entendre par là que ses molécules *gagnent* ou *perdent* de la force vive.

529. **Effets généraux : dilatation.** — Tous les corps se dilatent par l'effet de la chaleur. Les plus dilatables sont les gaz, puis viennent les liquides et enfin les solides.

1° *Dilatation des solides.* — La dilatation des solides est si faible, qu'on ne peut la rendre visible directement qu'en employant des dispositifs particuliers.

Expérience du pyromètre à cadran. — Par exemple, on prend

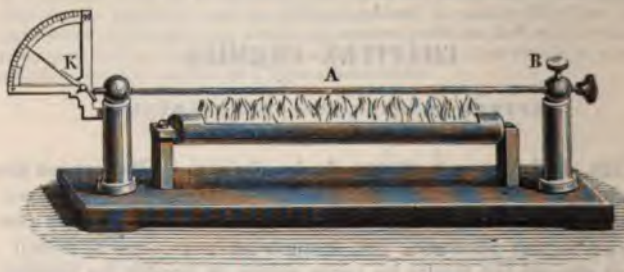


Fig. 537.

une tige métallique A (fig. 537), qu'on fixe à l'une de ses extrémités par une vis de pression B, tandis qu'à l'autre elle reste libre et arrive au contact du plus petit bras d'un levier K, mobile sur un cadran. Au-dessous de la tige est un réservoir dans lequel on brûle de l'alcool. L'aiguille K est d'abord au zéro du cadran ; mais elle monte à mesure que la tige A s'échauffe, par suite de la dilatation linéaire de la tige.

Fig. 538.

Anneau de 's Gravesande. — On nomme ainsi un petit anneau métallique *m* (fig. 538) dans lequel passe librement, à la température ordinaire, une boule de cuivre *a* ayant le même diamètre. Lorsque cette boule a été chauffée toute seule à la flamme d'une lampe à alcool, elle ne peut plus passer à travers l'anneau demeuré *froid, ce qui* prouve l'accroissement de volume. Mais si l'on

chauffe en même temps, et également, la boule et l'anneau, le passage peut toujours s'opérer librement : ce qui prouve d'abord qu'un solide creux se dilate, et puis qu'il se dilate de la même manière qu'un solide plein de même nature et de même volume.

2° *Dilatation des liquides.* — On remplit d'un liquide coloré un petit ballon de verre auquel on a soudé un tube capillaire (fig. 539) : aussitôt qu'on l'échauffe, ce liquide s'élève dans le tube, de *a* en *b* par exemple. On remarque que cette dilatation est toujours beaucoup plus grande que dans les solides.

3° *Dilatation des gaz.* — Le même appareil sert à montrer la dilatation des gaz. Pour cela on remplit le ballon d'air, et l'on introduit dans le tube un index de mercure de 1 à 2 centimètres de longueur (fig. 540). Lorsqu'on échauffe le ballon, même en approchant la main, l'index est refoulé vers l'extrémité du tube, et finit par en être expulsé; d'où l'on conclut que, même pour un faible échauffement, les gaz sont très dilatables.

Fig. 539. Fig. 540.

4° *Variation de la force élastique des gaz.* — Si l'on chauffe un gaz en l'empêchant de se dilater, on augmente sa force élastique. L'effet de la chaleur consiste alors en un accroissement de force élastique du gaz chauffé. On pourrait aisément le mesurer en faisant communiquer l'extrémité du col du ballon avec l'une des branches d'un petit manomètre à eau.

5° *Contraction par le refroidissement.* — Dans ces diverses expériences, dès que les corps se refroidissent, ils se contractent, et lorsque leur état calorifique est redevenu le même qu'auparavant, ils reprennent exactement soit leur volume primitif, soit leur force élastique initiale.

530. **Effets généraux : changements d'état.** — 1° *Fusion.* — La dilatation des corps solides atteint une limite lorsqu'on les chauffe graduellement. Il arrive un moment où le corps solide devient le siège d'un nouveau phénomène physique : la *fusion*, c'est-à-dire *le passage de l'état solide à l'état liquide.*

Toutefois un grand nombre de substances composées, telles que le papier, le bois, la laine, certains sels, ne fondent pas sous l'action d'une source de chaleur même intense; mais elles sont

décomposées. De tous les corps simples, un seul n'a pu jusqu'ici être réellement fondu : c'est le carbone.

Lorsqu'on refroidit les corps solides liquéfiés, on les ramène à l'état solide : c'est le changement d'état inverse de la fusion, ou *solidification*.

2° *Vaporisation et vapeurs.* — L'action prolongée de la chaleur sur la matière a encore pour effet de la faire passer de l'état liquide à l'état de fluide aériforme. Ce phénomène est désigné sous le nom général de *vaporisation*, et l'on appelle *vapeurs* les fluides aériformes qui résultent de ce changement d'état.

Remarque. — Le caractère général des changements d'état physique, c'est que tout corps *en train de changer d'état* constitue un milieu dont *l'état calorifique est constant*. Ainsi la glace fondante et l'eau bouillante — sous une pression déterminée — constituent deux milieux dont *l'état calorifique est constant*.

NOTIONS ÉLÉMENTAIRES DE THERMOMÉTRIE.

531. **Température : définitions.** — L'état calorifique actuel d'un corps se manifeste à nous, tout d'abord, par les sensations de chaud ou de froid qu'il nous procure. Suivant que ces sensations, produites par deux corps A et B, sont identiques ou différentes, on dit que ces deux corps ont *la même température* ou des *températures différentes*.

Un corps qui est le siège d'un changement d'état physique, — fusion, solidification ou ébullition, — possède, avons-nous dit, un état calorifique permanent. On dit que c'est un milieu *à température constante*.

Si les deux corps A et B sont mis l'un et l'autre en contact durable avec un milieu C à température constante, ils finissent par prendre l'un et l'autre cette même température. On dit qu'ils sont alors en *équilibre de température*. A cet état, ils ne peuvent réagir l'un sur l'autre au point de vue calorifique : il ne peut y avoir entre eux aucun échange de chaleur. La *température* peut donc être considérée comme le facteur qui règle les échanges de chaleur entre les corps.

Thermométrie. — L'imperfection de nos sens ne nous permettant pas de mesurer la température des corps d'après les sensations qu'ils excitent en nous, on a dû recourir aux effets physiques qui accompagnent les variations de température. On a adopté les dilatations et les contractions, comme étant les plus simples à *observer* et les plus faciles à mesurer avec précision.

L'ensemble des méthodes employées pour mesurer les températures constitue la *thermométrie*.

Thermomètres. — On appelle *thermomètres* les instruments qui servent à mesurer les températures[1], et *thermoscopes* des instruments qui servent simplement à en indiquer les variations.

532. **Choix des substances thermométriques.** — Les solides étant très peu dilatables, les corps dont on utilise la dilatation pour la thermométrie ordinaire sont généralement les liquides. Toutefois les physiciens utilisent également la dilatation des gaz pour la *thermométrie de précision* (576).

Le mercure est le liquide thermométrique par excellence : d'abord, parce qu'il est de tous les liquides celui qui se dilate le plus régulièrement ; puis, parce qu'il n'entre en ébullition qu'à une température très élevée ; enfin, parce qu'il se met plus promptement que les autres liquides en équilibre de température avec les corps ambiants. Il doit cette dernière faculté à ce qu'il est un métal et que, par suite : 1° il est bien meilleur conducteur de la chaleur que tous les liquides, et 2° il exige moins de chaleur pour s'échauffer. On s'est beaucoup servi de l'alcool pour mesurer les basses températures, parce que ce liquide ne se congèle pas par les plus grands froids *naturels* connus[2]. On tend à le remplacer aujourd'hui par le toluène.

533. **Thermomètre à mercure.** — 1° *Description.* — Le thermomètre à mercure est le plus répandu. Il se compose d'un tube capillaire ou *tige*, en cristal ou mieux en *verre dur*, soudé à un réservoir cylindrique ou sphérique de même matière. Le réservoir et une partie du tube sont remplis de mercure, et une graduation tracée, soit sur le tube même, soit sur une règle de cuivre qui lui est parallèle, indique par la dilatation du liquide les variations de température : c'est ce qu'on appelle l'*échelle thermométrique*.

2° *Construction.* — La construction d'un thermomètre comprend plusieurs opérations délicates[3].

Choix de la tige. — Tous les tubes, tels qu'ils sortent de la fabrique, ne sont pas bons pour construire un thermomètre. Le premier soin de l'ouvrier doit être de rejeter les mauvais tubes et de réserver ceux qui sont susceptibles d'un bon emploi. Les

1. L'invention des thermomètres date de la fin du seizième siècle. Elle est attribuée par les uns à Galilée, par les autres à Drebbel, médecin hollandais, ou à Sanctorius, médecin vénitien. *Thermomètre* vient de θερμός, chaleur, et μέτρον, mesure ; *thermoscope* vient de σκοπεῖν, examiner.

2. Nous verrons plus loin que l'alcool a été congelé, à l'aide de froids *artificiels*, par M. Wroblewski.

3. Tous les détails relatifs à la construction courante des thermomètres nous ont été fournis par M. Victor Chabaud, chef de la maison Alvergniat.

bonnes tiges sont celles dans lesquelles un index de mercure, promené sur toute leur longueur, présente une hauteur sensiblement constante.

Division du tube. — Lorsque le tube doit servir pour un instrument de précision, il importe qu'il soit gradué en parties d'égale capacité. Pour cela, lorsque les variations de l'index de mercure sont peu sensibles, on colle le long du tube une bande de papier, et l'on marque un trait au crayon en regard des points occupés successivement par les extrémités de la colonne.

Fig. 541.

Les divisions ainsi formées indiquent nécessairement des capacités égales, puisqu'elles correspondent à un même volume de mercure. Les intervalles de ces divisions étant assez rapprochés pour qu'on puisse regarder le diamètre du tube comme constant dans chacune d'elles, on passe à des divisions plus petites, en partageant les premières en un certain nombre de parties égales. Cette dernière opération s'effectue à la machine à diviser.

Soufflage. — L'ouvrier soude alors une ampoule C (fig. 541) à l'extrémité supérieure de la tige et un réservoir en bas. L'habitude du métier lui permet de donner d'avance à ce réservoir des dimensions convenables pour la quantité de mercure qu'il doit contenir. Il s'en assure d'ailleurs en remplissant de mercure ce réservoir *grosso modo* jusqu'à ce qu'il monte jusqu'à la tige, et en prenant immédiatement deux points qui lui donnent approximativement la longueur du degré. Si cette longueur répond à celle qui lui est imposée par la course que doit fournir le mercure dans la tige, c'est que le réservoir a de bonnes dimensions. S'il est trop grand ou trop petit, l'ouvrier modifie le réservoir ou en souffle un nouveau, jusqu'à ce qu'il arrive aux bonnes dimensions. Il en retire le mercure qui a servi à l'essai, puis il le ferme en l'état où il doit servir, une fois l'instrument terminé.

Remplissage. — On procède alors au remplissage. On introduit *dans l'ampoule* supérieure une certaine quantité de mercure pur

et sec, plus grande que la quantité nécessaire ; puis, inclinant un peu le tube, on chauffe le réservoir avec une lampe à alcool, ou bien avec des charbons incandescents sur une grille inclinée (fig. 162). L'air dilaté sort en partie par l'entonnoir C. Si on laisse alors refroidir le tube tout en le maintenant dans une position verticale, l'air qui reste se contracte, et la pression atmosphérique force le mercure à passer dans le réservoir D, quelque capillaire que soit le tube. On réitère l'opération jusqu'à ce qu'il ne reste plus dans le réservoir D qu'un très petit volume d'air. En faisant alors bouillir le mercure, on expulse, par les vapeurs mercurielles, tout ce qui restait d'air et d'humidité dans le tube et dans le réservoir.

On détache alors l'ampoule supérieure en laissant à l'extrémité correspondante une pointe finement effilée. On chauffe ensuite le réservoir jusqu'à ce que le liquide dilaté atteigne le sommet du tube.

Lorsqu'on a fait écouler tout l'excès de mercure qui avait été introduit dans l'instrument, on détache à son tour la pointe, pendant qu'elle est encore pleine de mercure, de manière qu'il ne reste pas trace d'air au sommet. Le thermomètre est alors construit. Il ne reste plus qu'à souder un anneau au sommet, ou à arrondir ce sommet, en y faisant dilater une petite chambre si on le juge à propos (fig. 546).

Fig. 512

534. **Graduation du thermomètre : points fixes de l'échelle.** — *Graduer* le thermomètre, c'est munir la tige d'une *échelle des températures*. Pour cela, on commence par marquer sur cette tige deux points fixes qui correspondent à deux températures *faciles à reproduire* et toujours *identiques à elles-mêmes*.

Or nous avons déjà dit que la glace fondante et l'eau bouillante sous une pression déterminée constituent deux milieux à température constante. On est convenu de prendre pour *premier point fixe* la température de la glace fondante, et d'en faire *le zéro* de l'échelle des températures; et pour *second point fixe* la température à laquelle l'eau distillée, chauffée dans un vase métallique, entre en ébullition sous la pression nor-

male de 76 cm : on en a fait *le degré* 100. La graduation du thermomètre comprend donc trois opérations : la détermination du zéro, celle du point 100, et le tracé de l'échelle.

I. *Détermination du zéro.* — 1° *Thermomètres ordinaires.* — On se contentait jadis de plonger le réservoir du thermomètre, au milieu de glace pilée, dans un simple vase dont le fond était percé d'un trou pour laisser écouler l'eau provenant de la fusion de la glace (fig. 542). Cet appareil peut servir pour des thermomètres ordinaires ou pour la vérification rapide du zéro.

2° *Thermomètres de précision.* — Le bureau international de Sèvres en a mis un autre en usage pour la thermométrie de précision. Une cloche à douille A en verre, d'une capacité de quelques litres, munie d'un robinet à écoulement à la partie inférieure (fig. 543), est maintenue verticalement par un support; celui-ci porte, en outre, deux tiges B, B avec des entailles garnies de liège, dans lesquelles le thermomètre T est pressé doucement par un ressort C.

Fig. 543.

La glace, *finement râpée*, est placée dans la cloche, puis additionnée d'eau distillée et fortement tassée avec un morceau de bois; le robinet est alors ouvert pour laisser couler l'eau en excès, qu'on a amenée à sa surface en comprimant la glace; aussitôt que la surface de la glace commence à se sécher, on referme le robinet. La masse de la glace doit rester imprégnée d'eau. Les déterminations dans la glace sèche pourraient être faussées, soit parce que le contact avec le thermomètre est imparfait, soit parce que la température de la glace est inférieure à 0° : suivant les cas, l'erreur est positive ou négative. La glace étant ainsi préparée, on y perce un trou avec une baguette de verre appuyée contre les tiges B; le trou ne doit pas être prolongé jusqu'au fond de la cloche.

Remarque. — Cette opération doit être recommencée chaque fois qu'on se sert de l'instrument pour des mesures de précision; car un thermomètre qui a été chauffé conserve, après refroidissement, un *résidu* de dilatation d'où résulte le *déplacement du zéro*, phénomène d'autant plus marqué que le thermomètre a été soumis à une température plus élevée.

II. *Détermination du point* 100. — 1° *Thermomètres ordinaires.* — Le second point fixe se détermine au moyen de l'appareil de *Regnault* (fig. 544, coupe verticale).

Tout l'appareil est en cuivre rouge. Un gros tube central A, ouvert à ses deux bouts (fig. 544), est fixé sur un vase cylindrique M, contenant de l'eau; une sorte de manchon B, concentrique au tube A, et l'entourant en entier, est fixé sur le même vase M. Cette seconde enveloppe, fermée à ses deux extrémités, est munie de trois tubulures *a*, E, D : en *a*, passe dans un bouchon la tige *t* du thermomètre dont on cherche le point 100; en E est adapté un manomètre tronqué en verre, destiné à comparer à la pression extérieure la tension de la vapeur intérieure; enfin, la troisième tubulure D permet à la vapeur de se dégager dans l'atmosphère après qu'elle a circulé autour du thermomètre. La deuxième enveloppe B empêche le refroidissement du tube central en le préservant de tout contact avec l'air. On marque au point *a*, où le niveau du mercure s'arrête, un trait qui est le point 100 cherché.

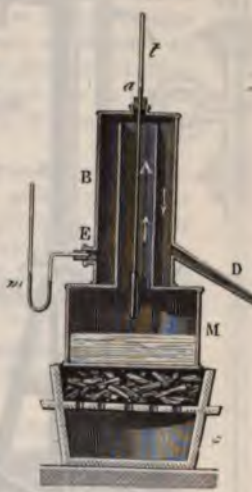


Fig. 544.

2° *Thermomètres de précision.* — On emploie, au bureau de Sèvres, un autre appareil et un procédé perfectionné. Le thermomètre T (fig. 545) est placé dans un gros tube à double circulation A; il traverse à frottement un bouchon de liège maintenu dans une douille, et qui ferme exactement l'orifice supérieur (fig. 545, *b*); cette douille, indépendante du couvercle, est retenue en place par une petite tige en laiton passant sous une glissière. Pour plus de sûreté, le thermomètre est suspendu par un fil à une tige métallique que l'on peut fixer à une hauteur convenable; il est, en outre, guidé par deux pièces P, percées de trous qu'il traverse par un petit entonnoir central en entrant à frottement dans l'intérieur du tube.

Le tube A est supporté par un tuyau horizontal B formant axe, et qui pénètre dans les paliers M_1 et M_2 (fig. 545, *a*); il peut être placé verticalement ou horizontalement : on peut ainsi évaluer l'influence des poids de la colonne de mercure sur la place du degré 100. Sa position est déterminée par deux arrêts N, avec vis de réglage; une clef de sûreté F le maintient dans sa position verticale; un manche en bois sert à le manœuvrer. Du côté du support M_1 le tuyau B est en communication avec le tube intérieur où est placé le thermomètre; du côté de M_2, il est relié seulement au manchon extérieur.

La vapeur développée dans la chaudière en cuivre C arrive en M_1 par un tube de plomb D entouré de feutre, puis entre dans l'intérieur du tube A, qu'elle parcourt dans toute sa longueur, passe entre les parois, et sort en M_2. Elle se condense dans un tube vertical E, ouvert par le haut et enveloppé d'une circulation d'eau froide; l'eau condensée est ramenée au fond de la chaudière par le tube K. Un manomètre à eau H indique la différence des pressions inté-

rieure et extérieure, autrement dit la pression dans l'appareil. Les lectures se font avec une petite lunette L fixée au tube A. La colonne mercurielle ne doit dépasser le bouchon que de la quantité strictement nécessaire à l'observation. D'après la position du manomètre, la différence de niveau dans les deux branches indique l'excès de pression de la vapeur à la sortie de la chaudière. On aura la pression totale dans l'appareil en ajoutant à la pression, mesurée au baromètre, la moitié de l'excès, toujours très petit, indiqué par le manomètre.

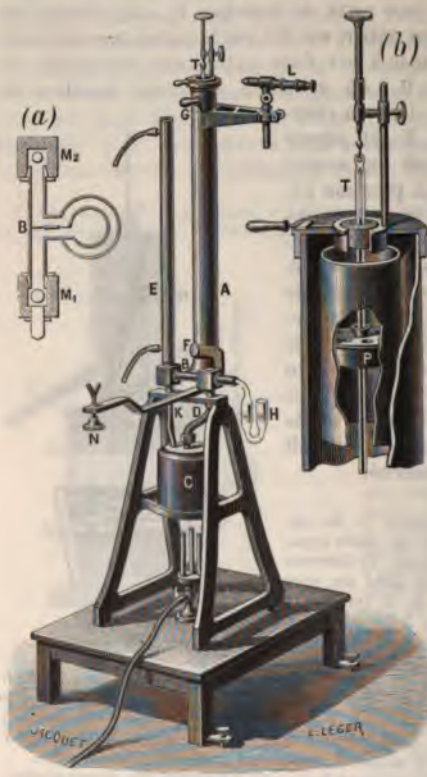


Fig. 545.

Le thermomètre doit rester exposé à la température de 100° aussi longtemps que le déplacement du zéro est encore sensible, c'est-à-dire de quelques minutes à une heure environ, suivant la nature de l'enveloppe.

3° *Correction relative à la pression extérieure.* — On ne peut marquer 100° au point où s'arrête le mercure qu'autant que la pression totale dans l'appareil est égale à 76 cm. Suivant qu'elle est inférieure ou supérieure à 76 cm, la température d'ébullition de l'eau correspond à une température inférieure ou supérieure à 100°.

On peut la calculer d'après la formule suivante, employée par le Bureau de Sèvres :

$$T - 100^\circ = \frac{H - 760}{27,25}.$$

Elle donne une élévation de 1° pour un accroissement de 27,25 mm.

III. *Construction de l'échelle.* — Les deux points fixes étant obtenus, si l'instrument est ordinaire, le graveur divisera l'inter-

valle de 0° à 100° en 100 parties égales, puis il inscrira des chiffres de 10 en 10 : il gravera ensuite les divisions et les nombres à l'acide fluorhydrique. L'ensemble de ces divisions constitue l'*échelle thermométrique*.

Pour les instruments de précision, on se sert des divisions d'égale capacité qui ont été tracées préalablement. On compte, à la machine à diviser, le nombre de ces divisions comprises entre les deux points fixes, et, divisant ce nombre par 100, on a le nombre de divisions et fractions de division qui équivaut à 1 degré; on en déduit ensuite, à partir du zéro, la position de chaque degré (fig. 546).

Fig. 546.

Remarque. — Les divisions du thermomètre se nomment *degrés*, et se notent par un petit zéro placé à droite du nombre qui marque la température, et un peu au-dessus. Pour distinguer les températures au-dessous de zéro de celles au-dessus, on les fait précéder du signe — (*moins*) : 15 degrés au-dessous de zéro se représentent donc par — 15°.

535. **Différentes échelles thermométriques.** — On en distingue trois principales : l'*échelle centigrade*, l'*échelle de Réaumur* et l'*échelle de Fahrenheit*.

1° *Échelle centigrade.* — L'échelle centigrade est celle dont nous avons indiqué ci-dessus la construction ; elle est généralement adoptée en France. Elle est due au physicien suédois Celsius. Le *degré centigrade* doit donc être défini : la *centième partie* de la dilatation apparente que subit le mercure dans le thermomètre, entre la température de la glace fondante et celle de l'eau bouillante sous la pression 76 cm.

2° *Échelle Réaumur.* — En 1731 le physicien français Réaumur proposa les mêmes points fixes, mais partagea leur intervalle en 80°.

80° Réaumur équivalent donc à 100° centigrades : il en résulte que 1° R. équivaut à $\frac{5}{4}$ de degré C.

3° *Échelle Fahrenheit.* — Fahrenheit proposa, en 1714, une échelle dont l'usage s'est répandu depuis en Hollande, en Angleterre et dans l'Amérique du Nord. Le point fixe supérieur de cette échelle correspond aussi à la température de l'eau bouillante ; mais le zéro correspond à la température qu'on obtient en mélangeant des poids égaux de sel ammoniac pilé et de neige : l'intervalle des deux points fixes est divisé en 212°.

Le thermomètre F., dans la glace fondante, marque 32°; par conséquent, 100° C. équivalent à 180° F. et 1° C. équivaut à $\frac{9}{5}$ de degré F.

4° *Conversion des échelles.* — Soit, par exemple, à convertir en degrés C une température déjà évaluée en degrés F., soit 95° F. On doit d'abord retrancher 32 du nombre donné, afin de comparer les deux échelles à partir d'un même point : le reste est ici 63; or, 1° F. valant $\frac{5}{9}$ de degré C., 63° F. égalent $\frac{5}{9} \times 63$ ou 35° C : donc un thermomètre C marquerait 35° dans le même milieu où le thermomètre F marque 95°.

En représentant par t_f et par t_c ces deux températures, on a la formule générale

$$[1] \qquad t_c = (t_f - 32)\frac{5}{9},$$

qui indique les calculs à effectuer pour opérer la conversion. De cette égalité on tire

$$[2] \qquad t_f = t_c \times \frac{9}{5} + 32,$$

formule qui sert à convertir les degrés C. en degrés F.

536. **Déplacement du zéro.** — Nous avons vu que les thermomètres sont soumis à une cause d'erreur dont nous avons tenu compte : le zéro tend à s'abaisser, c'est-à-dire que, le thermomètre étant plongé dans la glace fondante, après avoir été chauffé, le mercure ne remonte plus au zéro primitif.

On observe, en outre, un *relèvement du zéro*, qui provient de la disparition progressive du *résidu* de dilatation initial. Ce travail moléculaire est lent; car, d'après les expériences de Despretz, le zéro peut remonter pendant plusieurs années.

On doit donc, pour les mesures de précision, n'employer que des thermomètres à échelles variables, dont on détermine les points fixes dans chaque opération.

Comparaison du verre dur et du cristal. — Les thermomètres en *verre dur*, tels qu'on les construit aujourd'hui, sont sujets à ce phénomène comme les anciens thermomètres en cristal, et leur déplacement croît également avec le degré de surchauffage qu'ils ont subi. Mais si l'on compare la courbe de déplacement du verre dur à celle du cristal, on voit que celle-ci est irrégulière, tandis que l'autre est très régulière. L'allure en est, de plus, très différente. Le déplacement est brusquement considérable, puis la va-

riation diminue pour une même élévation de température, et elle finit par devenir presque nulle. Si donc on prend un thermomètre en verre dur, et qu'on le chauffe à des températures élevées avant de le graduer, on peut espérer avoir un instrument où le déplacement du zéro deviendra négligeable.

537. **Conditions de sensibilité.** — *Thermomètres à échelles fractionnées.* — On peut considérer la sensibilité d'un thermomètre sous deux points de vue. En effet, un thermomètre est *sensible* : 1° lorsqu'il accuse de très petites variations de température; 2° quand il se met promptement en équilibre de température avec les corps ambiants.

On obtient le premier genre de sensibilité en donnant au thermomètre une tige très capillaire, soudée à un réservoir un peu gros. La marche du mercure dans la tige est alors limitée à un petit nombre de degrés, par exemple de 10 à 20, ou de 20 à 30, et chaque degré occupe une grande longueur sur la tige, ce qui donne le moyen d'évaluer des fractions de degré très petites. Avec dix thermomètres de ce genre, dont chacun comprendra 10 degrés de 0° à 10°, de 10° à 20°, etc., on pourra mesurer, avec une grande précision, toute température comprise entre 0° et 100°. C'est ce qu'on appelle une série de *thermomètres à échelles fractionnées.*

Le second genre de sensibilité se réalise en donnant au thermomètre un très petit réservoir; car moins le mercure a de masse, plus il prend rapidement la température du milieu dans lequel il se trouve.

538. **Thermomètre à alcool.** — Le *thermomètre à alcool* contient, au lieu de mercure, de l'alcool, coloré en rouge avec de l'orseille. Le remplissage en est facile, parce que ce liquide bout à la température peu élevée de 79°.

Construction. — Après avoir chauffé légèrement le réservoir, pour faire sortir un peu d'air, on plonge l'extrémité ouverte de la tige dans l'alcool coloré en rouge; par le refroidissement, l'air qui reste dans le réservoir se contracte, et la pression atmosphérique y fait monter une petite quantité d'alcool (fig. 547). On chauffe alors jusqu'à l'ébullition : les vapeurs d'alcool *qui se dégagent entraînent* tout l'air qui se trouve dans le *réservoir et dans la tige.* Il suffit ensuite, après quelques instant

Fig. 547.

d'ébullition, de retourner brusquement le thermomètre et d'en plonger de nouveau l'extrémité dans l'alcool. Les vapeurs se condensent, le vide se fait à l'intérieur et, par l'effet de la pression atmosphérique, le réservoir et la tige se remplissent complètement[1]. On chauffe doucement jusqu'à faire sortir la moitié ou les deux tiers du liquide contenu dans la tige, puis on en soude l'extrémité à la lampe, mais en ayant soin d'y laisser de l'air. Celui-ci est destiné à retarder, par sa force élastique, le point d'ébullition de l'alcool, et à empêcher, lorsqu'on incline le tube, que la colonne liquide ne se divise en plusieurs tronçons.

Graduation. — On prend le zéro dans la glace fondante, comme pour le thermomètre à mercure; puis on fait la graduation par comparaison avec un thermomètre étalon à mercure, et en prenant seulement pour limite supérieure de l'échelle 60° ou 70°.

539. **Thermomètres à liquides incongelables.** — L'alcool, qui n'est pas incongelable, puisqu'il a été solidifié par M. Wroblewski, a, en outre, l'inconvénient de devenir sirupeux aux températures très basses; enfin, les différents alcools n'ayant pas le même degré d'hydratation, on a vu des thermomètres à alcool, soumis au même refroidissement, différer de plusieurs degrés.

Pour obvier à ces inconvénients, on a proposé de remplacer l'alcool par plusieurs liquides également incongelables et ayant l'avantage d'être complètement anhydres et de conserver toujours la même fluidité, par exemple le sulfure de carbone, l'éther sulfurique et le chlorure d'éthyle.

Thermomètres à toluène. — M. Victor Chabaud a récemment proposé le *toluène*, dont la fluidité est très grande, même aux plus basses températures. Comme il ne bout qu'au-dessus de 100°, il permet de déterminer directement l'intervalle fondamental 0-100.

De plus, la contraction du toluène ayant été parfaitement étudiée jusqu'à — 70° au Bureau international de Sèvres, on peut, en se basant sur ces mesures, construire un thermomètre à toluène dont les indications soient tout à fait comparables à celles que donnerait un thermomètre à mercure.

En revanche, la construction d'un thermomètre à toluène est plus difficile que celle d'un thermomètre à alcool, car on doit prendre de grandes précautions pour éviter tout contact de l'air avec le liquide pendant le remplissage et le réglage de l'instrument.

1. Par suite de l'échauffement de l'alcool qui pénètre dans le réservoir, l'air qui y était en dissolution s'en dégage, et une petite bulle gazeuse peut se loger dans le réservoir. Pour l'expulser, on attache l'extrémité de la tige à une petite corde, et on fait tourner rapidement l'instrument comme une fronde. Par l'effet de la force centrifuge, l'alcool, qui a le plus de masse, est refoulé vers la boule et la bulle d'air est chassée à l'extérieur.

540. **Thermomètre métallique de Bréguet.** — Parmi les thermomètres ordinaires (ou thermoscopes), on peut citer un thermomètre entièrement métallique, construit par Abraham Bréguet, et qui est remarquable par sa grande sensibilité.

Le principe de cet instrument est l'*inégale dilatabilité des métaux*. Il est formé de trois lames superposées, de platine, d'or et d'argent. Soudées ensemble sur toute leur longueur, elles sont ensuite passées au laminoir de manière à ne former qu'un ruban métallique très mince. On contourne ce ruban en hélice, puis on en fixe l'extrémité supérieure à un support, et l'on suspend à l'autre extrémité une légère aiguille de cuivre, libre de se mouvoir sur un cadran horizontal qui porte une échelle centigrade (fig. 548).

Fig. 548.

L'argent, qui est le plus dilatable des trois métaux, forme la face intérieure de l'hélice; le platine, qui est le moins dilatable, est à l'extérieur, et l'or est entre les deux. Lorsque la température s'élève, l'argent se dilate plus que le platine et que l'or, et l'hélice se déroule; l'effet contraire a lieu quand la température s'abaisse. Ce thermomètre se gradue par comparaison avec un thermomètre étalon à mercure.

Remarques. — 1° Si l'on n'employait que l'argent et le platine, la grande différence de leurs dilatations pourrait occasionner une rupture de l'hélice. Mais la lame d'or empêche cet accident, à cause de sa dilatation intermédiaire.

2° Une tige métallique *a*, représentée sur la gauche de la figure, se place dans l'axe de l'hélice, pour la soutenir et l'empêcher de se déformer lorsqu'on déplace l'instrument.

541. **Thermomètres à maxima et à minima.** — Dans les observations météorologiques, il est nécessaire de connaître la plus haute température du jour et la plus basse température de la nuit. Des thermomètres ordinaires ne pourraient conduire aisément à la connaissance de ces températures. Aussi a-t-on imaginé, pour ce genre de mesures, des instruments particuliers, dits *thermomètres à maxima* et *à minima*.

542. **Thermomètres de Rutherford.** — Les plus simples sont ceux de Rutherford. Sur une même glace sont fixés deux thermomètres à tiges recourbées horizontalement. Dans le premier, qui est à mercure, on a introduit un petit index cylindrique en fer A (fig. 549), qui peut glisser librement dans le tube. L'index, étant

d'abord amené au contact de la colonne de mercure (et l'instrument disposé horizontalement), est poussé devant elle lorsque la température s'élève et que le mercure se dilate; mais il demeure au même point de la tige lorsque le mercure se contracte, parce qu'il n'y a pas adhérence entre ce liquide et le fer. Le point où s'arrête l'index marque donc la plus haute température qui se soit produite pendant la période de l'observation.

Dans le *thermomètre à minima*, le liquide est de l'alcool dans

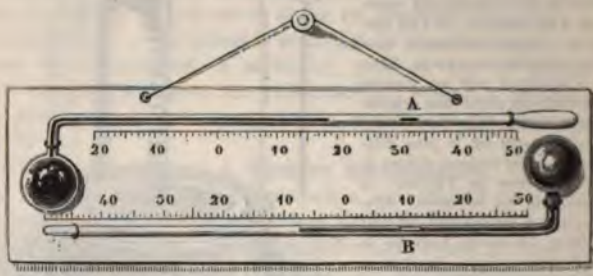


Fig. 549.

lequel plonge entièrement un petit cylindre d'émail B destiné à servir d'index (fig. 549). Si la température s'abaisse pendant que le cylindre est à l'extrémité de la colonne liquide, celle-ci, qui mouille l'émail et y adhère légèrement, l'entraîne avec elle en se contractant : l'index avance ainsi jusqu'au point où a lieu le maximum de contraction du liquide. Quand la température s'élève, l'alcool se dilate et passe entre la paroi du tube et l'index, sans que celui-ci se déplace. Par conséquent, l'extrémité de l'index *la plus éloignée du réservoir* indique la plus basse température à laquelle ait été porté l'instrument.

543. **Thermomètre à maxima de Walferdin** ou **Thermomètre à déversement.** — Ce thermomètre, dit *à déversement*, est fondé sur un tout autre principe. Il a la forme d'un thermomètre à mercure ordinaire qui est muni, à la partie supérieure, d'un petit réservoir ou *panse*, où la tige pénètre et se termine par une pointe effilée et ouverte (fig. 550).

Préparation de l'instrument. — Dans cette panse il y a du mercure. On s'en sert pour *amorcer* l'instrument, c'est-à-dire pour remplir complètement la tige avant chaque observation. Pour cela, on chauffe le réservoir inférieur *jusqu'à ce que* le mercure, en se dilatant, commence à sortir par la pointe *effilée*. On retourne alors le tube : le mercure qui est dans la panse descend *vers la pointe* et celle-ci y plonge en entier ; puis on laisse le thermomètre se *refroidir lentement*, en ayant soin de le tenir toujours renversé. Par le refroi-

dissement, le mercure du réservoir se contracte, et il en passe une certaine quantité de la panse dans la tige, jusqu'à ce que celle-ci soit complètement remplie.

Usage. — Pour se servir de cet instrument, on commence par l'amorcer à une température inférieure à celle qu'il s'agit d'observer, puis on le place dans le milieu dont on veut connaître la température maximum. S'il vient d'abord à se refroidir, il n'y a aucun inconvénient, puisqu'il n'entre ni ne sort de mercure. Mais si la température s'élève, le mercure se dilate, une partie se déverse dans la panse sans pouvoir rentrer dans le thermomètre, parce que celui-ci est alors dans la position représentée dans la figure 550.

Une fois l'équilibre établi, on détermine la température maximum par une opération subséquente. On n'a qu'à comparer l'instrument à un thermomètre étalon, en le chauffant à côté de celui-ci, dans un même bain, jusqu'à ce que le mercure remonte au sommet de la tige et soit prêt à en sortir.

544. Thermomètre à maxima et à minima de Miller-Casella. — D'après un principe analogue au précédent, Miller-Casella construisit un thermomètre pouvant donner tout seul les maxima et les minima.

Il se compose d'un tube de verre *ab* recourbé en forme d'U (fig. 551, I et II) et terminé à ses deux extrémités par deux réservoirs A et B juxtaposés. Le fond du tube contient, dans les deux branches, du mercure au-dessus duquel flotte un mélange d'alcool, d'eau et de créosote. Le réservoir A en est rempli complètement, tandis qu'il reste dans le réservoir B une petite masse d'air confinée au-dessus du liquide. Deux index en acier, *i* et *i'*, peuvent être poussés par les niveaux mercuriels lorsqu'ils avancent; mais ils restent en place lorsque les ménisques reculent, grâce à un fil de verre qui les entoure et qui forme ressort. La température s'élève-t-elle, le liquide du réservoir A se dilate et pousse le mercure, et par suite l'index *i'*, dans la branche *b*. Le contraire se produit lorsque la température s'abaisse : l'index *i* est poussé par le mercure qui s'avance en A Une échelle portée par la branche *b* indique les maxima, et une échelle portée par la branche *a* marque les minima.

Remarque. — Ce thermomètre a été longtemps utilisé pour évaluer la température du fond des mers. Dans ce cas, le réservoir A est entouré d'une seconde enveloppe EE (fig. 551, II), séparée de la première par un petit espace rempli aux trois quarts d'alcool amylique. Le thermomètre est en outre muni d'une graduation supplémentaire, faite à la presse hydraulique, dans laquelle on a tenu compte de l'effet des compressions du réservoir. Elle va de 157 kg à 628 kg par cm².

Fig. 550.

545. Thermomètres à renversement. — Type Negretti et Zambra. — Perfectionnement de M. Chabaud. — Même corrigés de l'effet de la pression, tous les thermomètres à maxima manquent de précision pour ce dernier usage, car ils fournissent non pas la température de la couche la plus profonde qui ait été explorée, mais seulement les températures extrêmes des couches traversées. On n'a pu faire de mesures rigoureuses qu'en se servant des *thermomètres à renversement.*

On peut citer comme type de ces instruments le modèle de Negretti et Zambra (fig. 552). C'est un thermomètre à mercure qui porte, en un point de sa tige, un étranglement *e* suivi d'une ampoule, et qui se termine par une sorte de second réservoir B, *plus petit que le* réservoir A. L'appareil est descendu, tout *droit, dans la couche à explorer.* Après un séjour assez long pour que l'équilibre

de température soit établi, on le retourne sur place, bout pour bout, au moyen d'un mécanisme approprié. Alors la colonne de mercure se rompt en *e* et tombe dans la partie supérieure du tube, qui était libre jusque-là. Cette portion du tube a été calibrée et graduée d'avance; c'est elle qui constitue à proprement parler le thermomètre. On n'a plus qu'à faire la lecture sur sa graduation, une fois que l'appareil a été remonté à bord.

Il va sans dire qu'on a protégé le gros réservoir contre les effets de la pression hydrostatique, en le munissant d'une double enveloppe.

M. Chabaud a apporté d'heureux perfectionnements à ce précieux instrument des océanographes. D'abord, il ne met pas le réservoir thermométrique A dans le

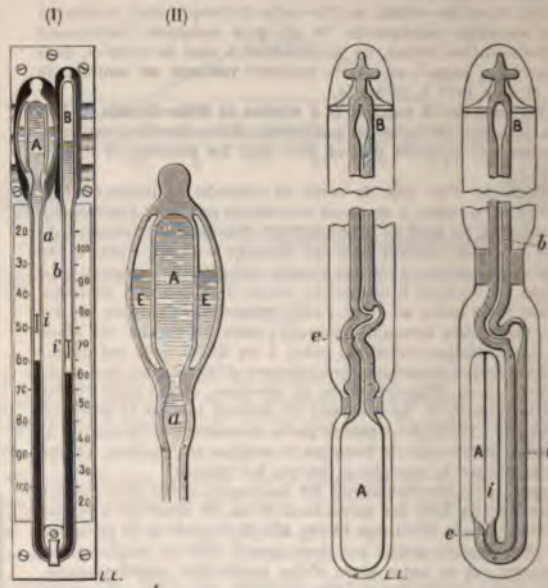


Fig. 551. Fig. 552. Fig. 553.

prolongement de la tige; il le recourbe (fig. 553) de manière à former avec elle un U à branches presque accolées. La tige est faite de deux parties soudées l'une à l'autre : la partie supérieure *b* porte les degrés, et la partie inférieure *a*, beaucoup plus capillaire, vient se souder au réservoir, et entre ces deux parties se trouve une *chambre préservatrice r*, de forme spéciale, qui est dilatée dans l'épaisseur du verre. L'étranglement *e* est réalisé par une obturation incomplète du canal thermométrique, qui est produite à la naissance même du réservoir au moyen d'une tige *i* (fig. 553), traversant le cylindre *de part en part* et soudée à l'extrémité opposée à la tige.

L'instrument est tout entier renfermé dans une enveloppe de verre épais, qui *contient*, dans la partie correspondante au réservoir, une masse de mercure *destinée à protéger* celui-ci.

Quand on retourne le thermomètre, le poids du mercure du réservoir n'agit plus sur l'étranglement *e*, — comme dans le modèle primitif, — et l'on évite ainsi un danger de rupture. Il en résulte un autre avantage : il ne peut plus tomber dans la *chambre préservatrice* que le mercure provenant de la dilatation subie par le thermomètre en passant des couches froides dans des couches chaudes [1].

546. Pyromètres. — On nomme *pyromètres* des instruments propres à mesurer les hautes températures. Brongniart avait fait construire, pour la Manufacture de porcelaine de Sèvres, un pyromètre (fig. 554) qui avait du rapport avec le pyromètre à cadran (fig. 537) et qui n'était, à proprement parler, qu'un pyroscope. Cet instrument fut d'ailleurs abandonné du vivant même de son auteur, parce qu'il ne donnait pas d'indications précises.

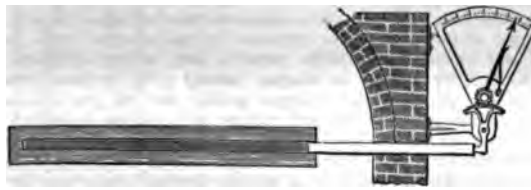


Fig. 554.

On a longtemps décrit dans les traités de physique le pyromètre de Wedgwood, fondé sur la propriété qu'a l'argile de se contracter lorsqu'elle est portée à une température élevée. Tout imparfait qu'il était, cet instrument donnait une solution approchée d'un problème très important au point de vue industriel.

Les seuls pyromètres précis sont le *pyromètre à air* et le *pyromètre électrique* : nous les décrirons plus loin.

Résumé de pyrométrie. — La pyrométrie a fait de grands progrès dans ces dernières années, tant au point de vue scientifique qu'au point de vue industriel.

1° *Thermomètre normal.* — Le thermomètre normal à hydrogène, installé définitivement au Bureau international des poids et mesures, permet de faire des mesures de haute précision dans un vaste intervalle de température, depuis — 140° jusqu'à 1500° environ [2]. Mais cet appareil est d'un emploi délicat, sa manipulation exige une grande habileté, et le volume considérable de son réservoir le rend peu propre aux mesures industrielles.

2° *Thermomètres à liquide.* — Les thermomètres à liquide sont d'un emploi beaucoup plus pratique ; mais ils ne peuvent servir qu'entre des températures relativement peu éloignées : témoin le mercure, dont les indications n'ont de valeur que dans un intervalle d'environ 300°.

1. Quatre instruments de ce genre ont parfaitement fonctionné entre les mains de M. Thoulet, à bord du yacht du prince de Monaco, dans une série de mesures faites à Boulogne-sur-Mer.

2. *Nous décrirons ci-dessous le thermomètre à hydrogène.*

3° *Méthode calorimétrique de M. Violle.* — M. Violle a proposé une méthode indirecte, qui est une méthode de calorimétrie (668, II). Elle lui a permis, entre autres résultats importants, d'établir les *points de fusion* rapportés au thermomètre normal, de différents métaux. Il a trouvé : pour l'argent, 954° C ; l'or, 1035° ; le cuivre, 1054° ; le palladium, 1500° ; le platine, 1775° ; l'iridium, 1950°.

Cette échelle de points de fusion constitue la base de la pyrométrie actuelle, car ils se substituent aux indications du thermomètre normal dans la graduation des divers pyromètres.

4° *Pyromètres électriques de Siemens, de H. Le Chatelier.* — La méthode calorimétrique, comme le pyromètre à hydrogène, exige certaines connaissances scientifiques qui la rendent impropre aux mesures industrielles proprement dites.

Il y a environ vingt-cinq ans, Siemens avait construit un pyromètre avec une spirale de platine, parcourue par un courant électrique, on évaluait les variations de résistance qui résultaient des variations de température.

M. H. Le Chatelier a utilisé les phénomènes thermo-électriques. On sait, depuis Seebeck, que si l'on établit une différence de température entre les deux soudures dans un circuit métallique formé de deux métaux différents soudés bout à bout, il s'y produit un courant électrique. Ce système forme une pile électrique, qui emprunte l'énergie qu'elle met en jeu à la soudure chauffée. Cette pile peut avoir un petit volume et la lecture de ses indications peut être faite à une distance quelconque du foyer. M. Le Chatelier a adopté des couples à soudure autogène, formés de platine et de ses alliages ; il les a gradués à l'aide des points de fusion de M. Violle. L'intensité des courants thermo-électriques produits est mesurée à l'aide d'un galvanomètre d'Arsonval. La durée de l'observation varie de 1 à 10 secondes.

M. H. Le Chatelier a fait, à l'aide de cet instrument, un grand nombre de déterminations de températures industrielles très importantes. Il a trouvé des nombres généralement inférieurs aux nombres admis avant lui ; par exemple, 1580° au lieu de 2000° pour l'acier en fusion ; 1370° au lieu de 1800° pour la cuisson de la porcelaine dure.

5° *Méthode des températures optiques.* — Toutes les méthodes précédentes ne peuvent servir qu'au-dessous de 2000°. Celle que M. Crova a imaginée, et appliquée en 1880 aux usines du Creusot, permet l'évaluation des températures les plus élevées.

Cette méthode est un développement scientifique ingénieux de l'habitude qu'on avait dans l'industrie d'apprécier les hautes températures aux couleurs, rouge sombre, rouge cerise, rouge blanc, etc., que prennent les corps incandescents. Ces changements de couleur sont accompagnés de variations de constitution dans le spectre de ces corps incandescents. Or, d'après M. Crova, le rapport des intensités de deux radiations déterminées (rouge et verte, par exemple) dépend *uniquement* de la température. Ni la substance, ni le pouvoir émissif du corps incandescent qui émet ces radiations n'influent sur ce rapport. Il suffit donc de comparer, par une mesure photométrique, l'intensité des radiations émises par le corps dont on veut *repérer* la température aux radiations de *même couleur* émises par une lampe modérateur-type, le carcel-étalon par exemple, dont on représente la température par un nombre arbitraire.

Dans l'industrie, on compare les intensités lumineuses prises par un morceau de platine, porté successivement aux diverses températures à évaluer, à l'intensité constante d'une *flamme étalon*. La comparaison portera sur deux *portions* monochromatiques des radiations émises, si l'on a soin de tamiser *les lumières à* travers un verre rouge Appert. (Procédé Crova, 346.)

547. **Thermomultiplicateur.** — Un autre appareil thermométrique très important est fondé sur le principe des courants thermo-électriques : c'est le *thermomultiplicateur*.

Description. — Il consiste dans la réunion de deux instruments que nous étudierons plus loin en détail, le *galvanomètre* de Nobili et la *pile thermo-électrique* de Melloni (fig. 555). Des pôles *m* et *n* de la pile P partent deux fils de cuivre, qui se rendent à deux bornes fixées en dehors de la cage du galvanomètre G. Par suite,

Fig. 555.

dès qu'un courant *thermo-électrique* prend naissance en raison de l'échauffement de l'une des faces de la pile, ce courant passe dans le galvanomètre par l'intermédiaire du circuit fermé *mbGan*P. Avant de faire la mesure, on a soin d'orienter les fils du cadre galvanométrique parallèlement à la direction de l'aiguille. Il ne reste plus qu'à observer la déviation de l'aiguille sur le cadran divisé du galvanomètre.

La quantité de chaleur reçue par la pile se déduit de la grandeur et du sens de la déviation. En effet, l'expérience a appris que, jusqu'à 20 degrés du galvanomètre, les déviations de l'aiguille sont proportionnelles à la quantité de chaleur qui tombe sur la face exposée au rayonnement. Pour les déviations plus grandes, les quantités de chaleur correspondantes sont données par des tables construites préalablement.

Afin d'arrêter les rayons calorifiques parasites, on place sur la face de la *pile qui est exposée* à la source de chaleur, un cône de *cuivre C noirci à l'intérieur*. Un écran circulaire, qu'on abaisse ou

qu'on élève à volonté, sert à laisser passer ou à intercepter la chaleur.

Remarque. — Le thermomultiplicateur est un véritable *thermomètre différentiel*; car il ne donne point la température absolue de la face de la pile qui reçoit les rayons calorifiques, mais la différence entre cette température et celle de la face opposée.

CHAPITRE II

DILATATION DES SOLIDES.

548. **Définitions préliminaires. — Coefficients de dilatation.** — On distingue dans les corps solides trois sortes de dilatations: la *dilatation linéaire* (c'est-à-dire suivant une seule dimension), la *dilatation cubique* (c'est-à-dire en volume) et la *dilatation superficielle* (c'est-à-dire en surface).

On nomme *coefficient de dilatation linéaire* l'allongement que prend l'*unité de longueur* d'un corps lorsque sa température s'élève de 0° à 1°, et *coefficient de dilatation cubique* l'accroissement que prend, dans le même cas, l'*unité de volume*.

Fig. 556.

Ces coefficients varient d'un corps à l'autre; pour un même corps, il existe entre eux une relation simple : *le coefficient de dilatation cubique est triple du coefficient de dilatation linéaire.*

Soit en effet un cube dont le côté a une longueur de 1 m à 0° (fig. 556). Si l'on représente par λ son *coefficient linéaire*, sa longueur à 1° deviendra $(1 + \lambda)$, et le volume du cube, qui était 1 à 0°, deviendra à 1° $(1 + \lambda)^3$, c'est-à-dire $1 + 3\lambda + 3\lambda^2 + \lambda^3$. Or l'allongement λ étant toujours une fraction très petite de la longueur totale, son carré λ^2 et son cube λ^3 sont des fractions assez petites pour être négligées par rapport à λ. L'accroissement de l'unité de volume — qui représente le *coefficient cubique* — se réduit donc à 3λ, c'est-à-dire au triple du coefficient linéaire.

Remarques. — 1° Cette simplification de calcul, par suppression des puissances de λ supérieures à la première, est de règle dans tous les calculs relatifs aux dilatations.

2° *Exception à la relation précédente.* — Cette démonstration s'applique seulement aux corps qui se dilatent en restant *semblables à eux-mêmes*. Or cela n'a lieu que pour les corps *amorphes* et pour les corps *cristallisés dans le système cubique*; tous les autres sont plus ou moins déformés par la dilatation, et nous verrons qu'il n'existe pas de relation aussi simple entre leurs coefficients linéaire et cubique (553).

549. **Formules relatives aux dilatations des solides.** — 1° Soient l_0 la longueur d'une barre à 0°, l_t sa longueur à la température t, et λ son coefficient de dilatation linéaire, *supposé constant* dans les limites données. Les relations qui existent entre ces diverses quantités s'expriment par les formules suivantes.

I. Par définition, l'allongement subi par la barre l_0 pour une élévation de température de t° est $l_0\lambda t$. La longueur de la barre, à t°, est donc devenue

$$[1] \qquad l_t = l_0 + l_0\lambda t = l_0(1 + \lambda t).$$

II. De la formule [1] on déduit

$$[2] \qquad \lambda = \frac{l_t - l_0}{l_0 t},$$

formule qui sert à calculer le coefficient de dilatation λ quand l_t, l_0 et t sont connus : c'est le *coefficient moyen* de dilatation entre 0° et t°.

III. Pour les dilatations cubiques, on trouve des formules analogues :

$$[3] \qquad V_t = V_0(1 + Kt) \quad \text{et} \quad K = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}. \qquad [4]$$

Les binômes $1 + \lambda t$ et $1 + Kt$ se désignent sous le nom de *binômes de dilatation*.

Les formules [3] et [4] s'appliquent également aux liquides et aux gaz.

IV. *Soit l_t la longueur d'une barre métallique à t°; quelle sera sa longueur $l_{t'}$ à t'°, son coefficient de dilatation étant λ?*

On cherche d'abord la longueur de la barre à 0° : elle est $\frac{l_t}{1 + \lambda t}$, d'après la formule [1]; puis de la longueur à 0° on passe à la longueur à t' au moyen de la formule [1], ce qui donne

$$l_{t'} = \frac{l_t(1 + \lambda t')}{1 + \lambda t}.$$

En effectuant la division algébrique indiquée, et négligeant les termes en λ^2, λ^3..., il vient

$$[5] \qquad l_{t'} = l_t\,[1 + \lambda\,(t' - t)].$$

V. *Relation entre le poids spécifique à 0° et les poids spécifiques à diverses températures.* — Lorsqu'on chauffe une masse déterminée d'un corps, son volume et, par suite, son poids spécifique varient, mais sa masse et son poids restent constants. Soit donc P le poids d'un corps, V_0 et D_0 son volume et son poids spécifique à t^0, et K le coefficient de dilatation cubique. On a évidemment, pour deux températures différentes,

$$P = V_0\,D_0 = V_t\,D_t, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{D_0}{D_t} = \frac{V_t}{V_0}.$$

Cette équation montre que les poids spécifiques varient, avec la température, en raison inverse des volumes. De là on déduit les relations suivantes, relatives aux poids spécifiques :

$$[6] \qquad D_t = \frac{D_0}{1 + Kt}, \qquad D_{t'} = D_t\,[1 - K\,(t' - t)]. \qquad [7]$$

550. **Mesure des coefficients de dilatation linéaire. — Expériences de Lavoisier et Laplace.** — De nombreux expérimentateurs ont mesuré les coefficients de dilatation linéaire. Les premiers résultats précis sont dus à Lavoisier et Laplace (1782), dont la méthode et l'appareil ont gardé un intérêt historique.

Description de l'appareil. — Une cuve de cuivre solidement établie sur un fourneau, entre quatre piliers de pierre, contient la substance à étudier, réduite

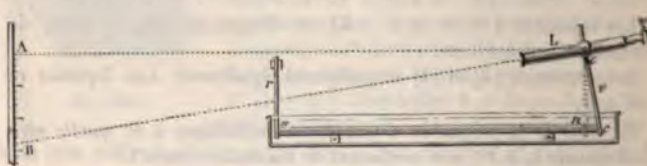


Fig. 557.

en barre de 2 mètres de long. D'un bout, la barre appuie contre une lame de verre *r* (fig. 557, coupe verticale), maintenue entre les deux piliers de gauche; de l'autre, elle peut s'allonger librement, en contact avec une deuxième lame de verre *v*, fixée à un axe horizontal d'acier, qui tourne dans deux coussinets sur les piliers à droite. A son extrémité antérieure, cet axe est terminé par une pièce en équerre sur laquelle est maintenue une lunette L, qui suit tous les

mouvements de l'axe et de la lame v et qui permet de viser les divisions d'une échelle verticale AB, placée à 200 mètres. Enfin, la barre repose, à chacune de ses extrémités, sur deux rouleaux de verre, en sorte qu'elle ne rencontre qu'une résistance extrêmement faible à son allongement.

Opération. — On mettait d'abord de la glace dans la cuve, et, la barre étant à zéro, les deux lames v et r en contact avec elle et la lunette dans une direction horizontale, on observait à quelle division correspondait le fil de la lunette sur l'échelle AB; puis on retirait la glace, on remplissait la cuve d'eau ou d'huile, et on chauffait. La barre se dilatait, et lorsque la température était devenue stationnaire, d'un côté on notait la température du bain à l'aide de thermomètres qui y étaient plongés, et de l'autre la division de l'échelle visée dans la lunette.

De ces données on déduisait ensuite l'allongement de la barre. En effet, celle-ci s'étant allongée d'une quantité nc, la tige v est repoussée et entraîne avec elle l'axe et la lunette; cette dernière s'incline alors dans la direction oB. Or les deux triangles onc et oAB sont semblables, comme ayant leurs côtés perpendiculaires chacun à chacun : on en déduit

$$\frac{nc}{AB} = \frac{on}{oA}, \qquad \text{d'où} \qquad nc = AB \cdot \frac{on}{oA}.$$

Or le rapport $\frac{on}{oA}$ est un nombre constant qu'on avait mesuré par une expérience préliminaire, en substituant à la barre ac une seconde barre plus longue d'une quantité connue : on avait trouvé

$$\frac{on}{oA} = \frac{1}{744}, \qquad \text{d'où} \qquad nc = \frac{AB}{744}.$$

En divisant nc par la longueur de la barre à 0° et par la température du bain, on avait le *coefficient de dilatation linéaire* de la substance.

551. **Méthode du comparateur.** — Pour mesurer *avec précision* la dilatation linéaire d'une règle ou d'une barre donnée, on emploie actuellement le *comparateur* déjà décrit (88). Au lieu de chercher à amplifier l'allongement, comme faisaient Laplace et Lavoisier, on le mesure tel quel au microscope. La règle à étudier est placée dans l'auge A (fig. 78), et dans l'auge A′ on dispose une règle étalon. On amène l'eau dans les auges aux températures T et t au moyen d'agitateurs et d'appareils spéciaux, appelés *thermorégulateurs*, permettant de réaliser des températures constantes et uniformes.

L'auge A étant disposée sous les microscopes, on relève les indications des thermomètres et on amène les réticules en coïncidence avec les traits qui limitent la longueur de la barre. Les réticules sont alors distants l'un de l'autre juste de la longueur L_t de la barre à t degrés.

On substitue alors l'auge A′ à l'auge A, puis on répète les *mêmes lectures. Il a fallu* déplacer les réticules d'une longueur

évidemment égale à la différence $(L_t - l_T)$ des deux règles aux températures respectives t et T.

En agissant sur le thermorégulateur de l'auge A, on donne à la température une nouvelle valeur t' et on mesure comme précédemment la différence $(L_{t'} - l_T)$.

Si l'on appelle L_0 la longueur à zéro de la barre et x le coefficient de dilatation moyen, on a

$$L_t = L_0(1 + xt) \quad \text{et} \quad L_{t'} = L_0(1 + xt');$$

par suite, en appelant a et b des différences mesurées directement, on a

$$L_0(1 + xt) - l_T = a \quad \text{et} \quad L_0(1 + xt') - l_T = b,$$

d'où

$$\frac{1 + xt}{1 + xt'} = \frac{a + l_T}{b + l_T} \quad \text{et} \quad x = \frac{a - b}{tl_T - t'l_T}.$$

La longueur l_T de la règle étalon est d'ailleurs connue à toutes les températures; il est donc facile de calculer x, puisque l'expérience de comparaison fournit directement a, b, t et t'.

Remarque : *Appareil de Roy et Ramsden.* — Un appareil analogue au comparateur, mais beaucoup moins précis, avait déjà été employé au même usage, en 1787, par le major Roy (de Londres). Il avait été construit par Ramsden. Il n'a plus aujourd'hui qu'un intérêt historique.

552. **Résultats généraux relatifs à la dilatation des solides.** — Les principaux résultats des diverses expériences faites sur la dilatation des corps solides non cristallisés sont les suivants :

1° La dilatation du verre et des métaux est uniforme entre 0° et 100°, c'est-à-dire que le coefficient de dilatation de ces substances est sensiblement constant entre ces limites, et que leur dilatation est proportionnelle à l'élévation de température.

2° Au delà de 100°, le coefficient de dilatation de ces corps n'est plus constant : il augmente quand la température s'élève. L'acier trempé paraît subir une variation inverse : son coefficient diminue quand la température s'élève.

3° La plupart des corps solides, après s'être dilatés par l'échauffement, entre 0° et 100°, se contractent par le refroidissement, de manière à reprendre leur volume initial. Quelques-uns font exception à cette règle générale, entre autres le zinc et le verre.

4° Les coefficients de dilatation linéaire moyens, qui ont été

trouvés par divers expérimentateurs, varient, pour une même substance, entre des limites assez étendues. Ainsi celui du zinc varie depuis 294 jusqu'à 341 *dix-millionièmes* entre 0° et 100°; celui de la fonte de fer depuis 98 jusqu'à 112 dix-millionièmes. Ces divergences tiennent d'abord à l'imperfection des méthodes de mesure, et puis à la variabilité de structure des échantillons des divers corps qui ont été soumis aux expériences.

553. Dilatation des cristaux. — Dilatomètre de Fizeau. — Nous avons dit que les corps solides homogènes et amorphes se dilatent en restant semblables à eux-mêmes. Mitscherlich découvrit, en 1825, qu'il n'en est pas de même pour la plupart des corps solides cristallisés. L'étude de leur dilatation irrégulière a été faite par M. Fizeau, au moyen d'une méthode très délicate. Elle consiste essentiellement à produire des anneaux de Newton par la superposition d'un plan de verre et d'une lame mince du cristal à étudier, puis à observer le déplacement des anneaux qui a lieu lorsqu'on élève la température du cristal. On déduit de ce déplacement, avec une grande précision, les dilatations éprouvées par la lame dans un sens perpendiculaire à ses faces.

Fig. 558.

L'appareil se compose d'une plate-forme S en platine iridié, munie de trois vis calantes *v* prenant appui sur un plan F, et supportant une lentille L dont la face inférieure est presque plane et porte des repères disposés en quinconce (fig. 558). Un morceau du corps à étudier C[1], terminé par deux faces parallèles et polies, est placé entre la plate-forme et la lentille. Les anneaux de Newton se produisent dans la lame d'air emprisonnée entre L et C et sont examinés par réflexion totale sur le prisme D. Le trépied est placé à l'intérieur d'une étuve en cuivre rouge EE dont la température est indiquée par un thermomètre *t*; l'étuve est chauffée à température constante au moyen d'un thermo-régulateur RR.

Résultats généraux. — Les principaux résultats sont les suivants :

I. *Système cubique* (exemples : *sel gemme, alun*). *La dilatation est la même dans toutes les directions.*

Il n'y a donc qu'un seul coefficient de dilatation, λ, qui est égal au tiers du

1. Le corps n'est pas nécessairement un cristal. La méthode est générale et *l'appareil, tel qu'il est installé au* Bureau international, sous le nom de dilato*mètre, peut s'appliquer à un solide* quelconque.

V. *Système clinorhombique* (exemple : *sulfat*

VI. *Système dissymétrique* ou *oblique* (exem

Ces trois derniers systèmes présentent la
coefficients linéaires différents, λ, λ', λ'', *sui*
laires.

Ces directions sont celles mêmes des axes d
elles sont quelconques, et sans relations simpl
deux derniers systèmes.

VII. *Anomalie de l'iodure d'argent.* — *Dilat*
découvert en outre que l'*iodure d'argent* possèd
lorsque la température *s'élève*, et de *se d*
s'abaisse. Le phénomène reste parfaitement r
jusqu'à + 70°. La dilatation de l'iodure d'ar
entre ces limites, par un *coefficient négatif.*

Les rhomboèdres de spath *se dilatent*, au cont
cristallographique principal, tandis qu'ils *se cont*
pendiculaires. Le *béryl* présente une anomalie a
gent cristallisé : sa dilatation est *négative* suiv
(quoique très faible) suivant la direction perpend

554. Applications de la dilatation
compensateurs. — L'inégale dilatation
importante application dans les *pendul*
tation inévitable de la tige y est *comp*
distance entre le centre de suspension
demeure indépendante de la températ
pour que l'isochronisme soit invariable
de compensation ont été proposés.

Pendule de Leroy ou *pendule*

de haut en bas, et, au contraire, celui des tiges de laiton de bas en haut. Par conséquent, pour que la longueur du pendule reste constante, il faut et il suffit que l'allongement des tiges de cuivre relève constamment la lentille juste de la même quantité dont l'allongement des tiges d'acier tend à l'abaisser.

2° *Condition de compensation.* — Les seules tiges *d'acier d, e, i* ajoutent leurs effets à celui de la lame *b* pour abaisser la lentille; car les deux autres tiges d'acier, qui sont symétriques de *d* et de *e*, sont liées respectivement à celles-ci par des traverses, de sorte que leurs allongements s'effectuent parallèlement à ceux de ces tiges sans s'y ajouter. On n'a de même qu'à considérer les tiges de *laiton c* et *n*, placées d'un même côté de l'axe.

Représentons par a, a', a'', a''' les longueurs des pièces d'acier b, d, e, i, et par c et c' celles des tiges de laiton c, n; et posons

$$a + a' + a'' + a''' = l \quad \text{et} \quad c + c' = l'.$$

Si l'on appelle k et k' les coefficients de dilatation linéaire de l'acier et du cuivre jaune, les allongements des deux métaux, à t degrés, seront respectivement lkt et $l'k't$. Pour que la longueur totale L du pendule reste constante, il faut donc qu'on ait

$$lkt = l'k't, \quad \text{ou} \quad lk = l'k'. \qquad [1]$$

Telle est la *condition de compensation.* Elle signifie que, *dans le pendule compensateur, les longueurs totales de l'acier et du cuivre doivent être en raison inverse des coefficients de dilatation de ces métaux.*

De plus, cette égalité ne contenant pas t, on en conclut que *la compensation a lieu à toutes les températures.*

3° *Longueurs totales du laiton et de l'acier.* — Connaissant la longueur totale L du pendule, on peut déterminer les longueurs totales, l et l', de l'acier et du laiton qui sont nécessaires pour réaliser la compensation. La longueur totale du pendule se compose d'abord de la tige b, puis de la tige i (jusqu'au centre de la lentille), enfin des deux intervalles qui séparent les trois châssis. Or le premier de ces intervalles est évidemment égal à la différence des tiges d et c, et le second à la différence des tiges e et n. On a donc

Fig. 559.

$$L = a + a''' + (a' - c) + (a'' - c''),$$

d'où

$$[2] \qquad L = (a + a' + a'' + a''') - (c + c') = l - l'.$$

Les équations [1] et [2] ci-dessus déterminent l et l'. En les résolvant, on trouve

$$[3] \qquad l = \frac{L}{1 - \frac{k'}{k}} \quad \text{et} \quad l' = \frac{L}{\frac{k'}{k} - 1}.$$

Ces formules font voir que l et l' sont plus grands que L : c'est pour satisfaire à cette condition qu'on est forcé, pour le pendule à secondes, de faire usage de plusieurs châssis d'acier et de laiton (k est pris généralement égal à 0,00001079 et k' à 0,00001878.

555. **Compensateur Graham.** — Ce pendule est formé d'une tige de fer (fig. 560) qui soutient, par l'intermédiaire d'un support en cristal, deux cylindres de cristal à peu près remplis de mercure. Le centre de gravité du pendule est donc abaissé par la dilatation de la tige, mais relevé par la dilatation du mercure. On calcule la hauteur de mercure qu'il faut employer pour obtenir une compensation parfaite.

Graham, qui a inventé ce procédé de compensation, suspendait son pendule par une tige de *verre*, au lieu d'une tige de fer. On peut également ne mettre qu'un seul tube à mercure en verre au lieu de deux.

Fig. 560.

Fig. 561.

556. **Lames compensatrices. — Compensateur Martin.** — On arrive encore à compenser l'allongement de la tige des pendules au moyen de *lames compensatrices*. On nomme ainsi deux lames de cuivre et de fer soudées ensemble et fixées à la tige du pendule. La lame de cuivre, qui est la plus dilatable, est au-dessous de la lame de fer.

Quand la température baisse, la tige du pendule se raccourcit et la lentille se relève; mais alors les lames compensatrices se recourbent, parce que le cuivre se contracte plus que le fer. De la sorte, deux boules métalliques, placées à l'extrémité des lames, s'abaissent (fig. 561), et, si elles ont une masse convenable, il s'établit une compensation entre les points qui se rapprochent du centre de suspension et ceux qui s'en écartent, ce qui fait que le centre d'oscillation n'est pas déplacé. Si la température monte, la lentille descend, mais les boules sont relevées, et il y a encore compensation.

Tel est le principe du *pendule compensateur Martin*. C'est un pendule ordinaire dont la tige porte un système de *lames compensatrices*, terminées par deux boules pesantes *en or*. On a calculé les dimensions de manière que la compensation soit parfaitement établie, d'après le mécanisme ci-dessus. Et comme les boules peuvent glisser sur les lames, à l'aide des vis de pression qui les fixent dans une position donnée, on peut, en les déplaçant, achever par tâtonnements la compensation.

CHAPITRE III

DILATATION DES LIQUIDES.

557. Définitions préliminaires. — *Dilatation apparente et dilatation absolue.* — Dans les liquides, il y a lieu de considérer la *dilatation absolue* et la *dilatation apparente.* Cette dernière est l'accroissement de volume que *paraît* prendre un liquide dans une enveloppe qui se dilate moins que lui : telle est la dilatation du mercure et de l'alcool qu'on observe dans les thermomètres. La dilatation *absolue* ou *réelle* est l'augmentation de volume que le liquide subit *réellement* dans l'enveloppe.

On rend sensible l'influence de l'enveloppe en plongeant dans l'eau chaude un thermomètre à gros réservoir, rempli, jusqu'à la moitié de sa tige, d'alcool coloré (fig. 562). Au moment où le réservoir entre dans l'eau, l'alcool baisse dans le tube, de *b* en *a*, ce qui provient évidemment de la dilatation des parois; mais si le réservoir reste immergé, l'alcool s'échauffe et monte d'une quantité égale à sa dilatation absolue, diminuée de celle de l'enveloppe.

Fig. 562.

On distingue donc pour les liquides le *coefficient de dilatation apparente* et le *coefficient de dilatation absolue.*

Relation entre les deux coefficients. — On peut démontrer rigoureusement que *le coefficient de dilatation absolue* Δ *d'un liquide est égal à son coefficient de dilatation apparente* δ, *augmenté du coefficient de dilatation* K *de l'enveloppe.*

En effet, prenons pour unité de volume le volume d'une masse déterminée d'un liquide à 0°. Élevons de 1° la température de ce liquide : *le volume apparent,* dans l'enveloppe qui le contient,

devient $1 + \delta$; mais chaque unité de capacité de l'enveloppe est devenue elle-même $1 + K$, en passant de la température 0° à la température 1° : donc le volume du liquide dilaté est, *en réalité*, égal à $(1 + \delta)(1 + K)$.

On a donc

$$1 + \Delta = (1 + \delta)(1 + K) = 1 + \delta + K + \delta K.$$

En supprimant l'unité de part et d'autre, ainsi que le produit δK, il reste

$$\Delta = \delta + K. \qquad \text{C. Q. F. D.}$$

558. **Dilatation absolue du mercure : Expériences de Dulong et Petit.** — *Principe de la méthode.* — Pour déterminer le coef-

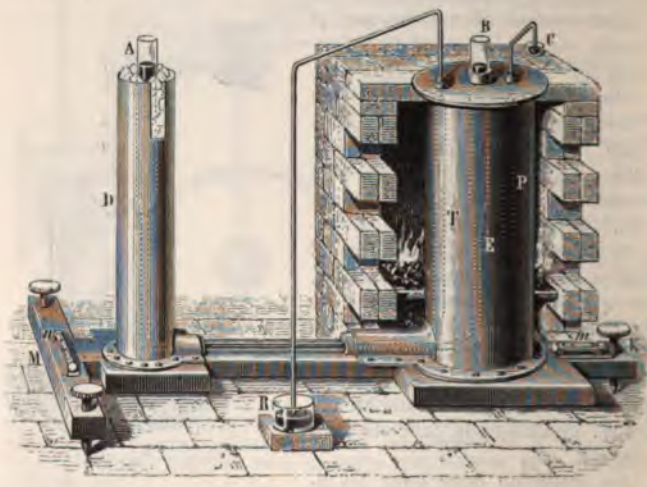


Fig. 565.

ficient de dilatation absolue du mercure, il fallait donc éliminer la dilatation de l'enveloppe. Dulong et Petit y sont parvenus, par l'application de ce principe d'hydrostatique : *Dans deux vases communicants, les hauteurs de deux liquides qui sont en équilibre sont en raison inverse de leurs densités* (124).

Description de l'appareil. — L'appareil se composait de deux tubes de verre, A et B (fig. 565), réunis par un tube capillaire, et

maintenus verticalement sur un support de fer KM. On pouvait disposer le support horizontalement à l'aide de vis calantes en se servant de deux niveaux à bulle d'air m et n. Les deux tubes étaient enveloppés chacun d'un manchon métallique, dont le plus petit, D, était rempli de glace pilée, et l'autre, E, d'huile qu'on chauffait graduellement au moyen d'un fourneau (la figure représente ce fourneau ouvert afin de laisser voir le manchon). Enfin les tubes A et B étaient remplis de mercure : le niveau était le même de part et d'autre quand ils étaient à la même température, mais il s'élevait peu à peu dans le tube B à mesure qu'on chauffait ce dernier.

Méthode. — Soient h_0 la hauteur à 0° du mercure dans le tube A, au-dessus de l'axe du tube horizontal, et d_0 sa densité, et soient h_t et d_t les mêmes données pour le tube B, à la température t.

On a
$$h_0 d_0 = h_t d_t.$$

On a d'ailleurs
$$d_t = \frac{d_0}{1 + \Delta t}$$

(Δ, coefficient de dilatation absolue du mercure). En substituant

$$\frac{h_t d_0}{1 + \Delta t} = h_0 d_0; \qquad \text{d où l'on déduit} \qquad \Delta = \frac{h_t - h_0}{h_0 t}.$$

Il suffisait donc de mesurer t, h_0 et la différence $h_t - h_0$.

Dulong et Petit évaluaient d'abord la température à l'aide d'un thermomètre à poids P (559) dont le mercure se déversait dans une capsule C, et de plus avec un *thermomètre à air* T (575). — Quant aux hauteurs h_0 et $h_t - h_0$, ils les mesuraient au cathétomètre.

Résultats. — Ils ont trouvé que le coefficient moyen de dilatation absolue du mercure est $\frac{1}{5550}$, entre 0° et 100° et qu'il croît avec la température. Entre 100° et 200°, il devient $\frac{1}{5425}$, et $\frac{1}{5300}$ entre 200 et 300°. Toutefois, de — 36° à 100°, la dilatation du mercure est très sensiblement *régulière*.

Critique de la méthode. — Expériences de Regnault. — La méthode précédente comportait plusieurs causes d'erreur. D'abord, la température t était toujours incertaine, parce qu'il n'était pas possible d'agiter le bain d'huile et, par suite, d'en égaliser la température au moment où l'on observait les ther-

momètres. De plus, les vases communicants A et B n'ayant qu'une hauteur de 0,55 m environ, la différence des niveaux $(h_t - h_0)$ était très petite en valeur absolue et l'erreur relative commise dans cette lecture était très grande.

Regnault reprit ces expériences, en y apportant toute la précision caractéristique de sa méthode expérimentale, et fut conduit à des résultats peu différents de ceux de Dulong et Petit. Il trouva que le coefficient de dilatation absolue du mercure est $\frac{1}{5547}$ entre 0° et 50°, et que ce coefficient croît d'une manière continue à mesure que la température s'élève.

La dilatation totale de l'unité de volume entre les limites 0° et T° peut se représenter par la formule empirique

$$\Delta_T = aT + bT^2.$$

Les coefficients a et b dépendent de la température T. Entre les limites 0° et 300°, leurs valeurs, déterminées par des expériences directes, sont

$$a = 0{,}000179 \quad \text{et} \quad b = 0{,}00000002522.$$

559. **Coefficient de dilatation apparente du mercure : Expériences de Dulong et Petit.** — Le coefficient de dilatation apparente d'un liquide varie avec la nature de l'enveloppe. Celui du mercure, dans le verre, a été déterminé par Dulong et Petit, par la méthode du *thermomètre à poids*.

L'appareil consiste en un réservoir cylindrique de verre auquel est soudé un tube capillaire, recourbé à angle droit et ouvert à

Fig. 564.

son extrémité (fig. 564). On le pèse, d'abord vide, puis rempli de mercure à 0°; la différence des deux pesées donne le poids P du mercure contenu dans l'appareil à 0°. Si on le porte ensuite à une température connue t, le mercure se dilate, et il en sort une certaine quantité qu'on recueille dans une petite capsule et qu'on pèse : soit p le poids du mercure sorti ; celui du mercure resté dans l'appareil est $P - p$.

Le volume occupé à 0° par cette masse de mercure est évidemment $\frac{P-p}{d_0}$, en appelant d_0 le poids spécifique à 0° du mercure. Cette même masse occupait à t° le volume apparent total du

thermomètre. Ce volume apparent a été jaugé à 0° et trouvé égal à $\frac{P}{d_0}$. La dilatation apparente totale du mercure a donc été

$$\left(\frac{P}{d_0} - \frac{P-p}{d_0}\right) \qquad \text{ou} \qquad \frac{p}{d_0}.$$

et le coefficient de dilatation apparente sera

$$\delta = \frac{\frac{p}{d_0}}{\frac{(P-p)t}{d_0}} \qquad \text{ou} \qquad \delta = \frac{p}{(P-p)t}.$$

Telle est la formule dite du *thermomètre à poids*.

Résultats. — Dulong et Petit ont ainsi trouvé que le coefficient de dilatation apparente du mercure dans le verre est $\frac{1}{6480}$.

560. **Thermomètre à poids.** — Cet appareil a reçu le nom de *thermomètre à poids*, parce que du poids de mercure sorti on peut déduire la température à laquelle l'instrument a été porté. En effet, l'expérience ci-dessus ayant conduit à la formule

$$\frac{p}{(P-p)t} = \frac{1}{6480},$$

on en tire

$$t = 6480 \cdot \frac{p}{P-p},$$

formule qui donne t lorsque P et p sont connus.

561. **Coefficient de dilatation du verre.** — On peut le déduire du coefficient de dilatation absolue du mercure, obtenu directement, et du coefficient de dilatation apparente, mesuré dans une enveloppe de ce même verre. En prenant, par exemple, les deux coefficients de Dulong et Petit, on trouvera pour le verre qu'ils ont employé

$$K = \frac{1}{5550} - \frac{1}{6480} = \frac{1}{38671} = 0{,}00002585^{1}.$$

1. Pour le verre ordinaire des tubes de chimie, on emploie souvent dans les calculs le nombre *approché* $\frac{1}{38700}$. Regnault a trouvé 0,0000254.

562. Coefficients de dilatation des divers liquides. — I. *Méthode de détermination.* — La méthode générale de détermination est également fondée sur la relation $\Delta = k + \delta$.

Résultats généraux. — 1° *Définition du coefficient moyen entre* t *et* t'. — Soient v et v' les volumes à t^0 et t'^0, le coefficient moyen entre t^0 et t'^0 est $\frac{1}{v}\frac{v'-v}{t'-t}$. Et si la variation $t'-t$ de température est très petite, on pourra dire que c'est le coefficient à la température moyenne θ entre t^0 et t'^0. Il caractérise la dilatabilité du liquide à cette température et à la pression constante sous laquelle on chauffe le corps; il varie avec cette température et avec cette pression.

2° *Expériences de M. Amagat.* — M. Amagat, qui a étudié les lois de ces variations entre des limites très étendues de pression et de température, a énoncé les résultats suivants, applicables à tous les liquides qu'il a étudiés, sauf l'eau.

A. Le coefficient de dilatation des liquides *diminue régulièrement* quand la pression *augmente*; cette diminution est d'autant plus rapide que la température est plus élevée.

(Par exemple, le coefficient moyen de l'éther entre 0° et 20° est : 0,001582 sous 1 atm, 0,000894 sous 1000 atm, 0,000680 sous 2000 atm, 0,000579 sous 3000 atm.)

B. Le coefficient de dilatation des liquides *augmente régulièrement* quand la température *s'élève*; cet accroissement est d'autant *moins rapide* que la pression est *plus forte*, et il devient *insensible* sous une pression suffisante.

(Par exemple, sous la pression constante de 200^{atm}, le coefficient de l'éther est égal à : 0,001520 entre 0° et 20°, — 0,001469 entre 40° et 60°, — 0,001614 entre 80° et 100°, — 0,002156 entre 138° et 198°; sous la pression de 1000 atm ce coefficient est sensiblement constant entre ces limites et égal à 0,0009.)

3° *Énorme dilatabilité des liquides très volatils. — Expériences de Drion, de M. Amagat et de MM. Cailletet et Mathias.* — Certains liquides très volatils, et qui entrent en ébullition à de basses températures, — tels que les gaz liquéfiés, — possèdent une dilatabilité comparable et même supérieure à celle des gaz.

Thilorier avait signalé dès 1836 l'énorme dilatation que subit l'acide carbonique liquide entre 0° et 30°; il l'estimait égale à 4 fois la dilatation de l'air dans les mêmes conditions.

Les expériences de Drion ont confirmé cette curieuse anomalie pour trois liquides volatils, de nature très différente, l'éther chlorhydrique, l'acide hypoazotique et l'acide sulfureux. Pour l'éther chlorhydrique, le coefficient de dilatation *atteint* celui de l'air à la température de 110°, et *il devient trois fois plus grand* à 930°. Pour l'acide hypoazotique, le coefficient est *plus grand* que celui de l'air dès 110°. Pour l'acide sulfureux, le coefficient est égal à celui de l'air dès 80°, et il est *triple* de celui de l'air à 130°.

D'après des expériences de M. Amagat, le coefficient moyen de l'acide carbonique liquide, entre 20° et 30° et sous la pression de 75 atm, est égal à 0,02166, soit *sept fois* celui des gaz parfaits.

Il peut devenir encore beaucoup plus grand, car, *à la température et sous la pression critique* (632), sa valeur devient *infinie*.

C'est, en effet, ce qui résulte des expériences de MM. Cailletet et Mathias, qui ont étudié l'acide sulfureux jusqu'à la température et sous la pression critiques. Ils ont trouvé : entre 156° et 155°,5, $\alpha = 0,7571$; entre 155°,5 et 155°, $\alpha = 0,2275$; entre 155° et 154°, $\alpha = 0,1345$; entre 152° et 150°, $\alpha = 0,04457$. On voit que dans le dernier demi-degré le coefficient moyen est égal à 200 fois environ le coefficient de dilatation des gaz, et le coefficient vrai devient *infini* à la température *critique*.

565. **Maximum de densité de l'eau.** — La loi de dilatation de l'eau est complètement différente de celle des autres liquides. L'eau présente, en effet, ce phénomène remarquable que, lorsque sa température s'abaisse, elle ne se contracte que jusqu'à 4°; au-dessous de ce point, quoique le refroidissement continue, non seulement la contraction cesse, mais le liquide se dilate jusqu'au point de congélation, qui a lieu à zéro : de sorte qu'à 4° l'eau éprouve un maximum de contraction.

Expérience de Hope. — On vérifie ce fait expérimentalement, à l'aide de l'appareil classique de Hope. Une éprouvette à pied est percée latéralement de deux trous, — l'un à la partie supérieure, l'autre à la partie inférieure, — dans lesquels sont fixés deux thermomètres (fig. 565) ; un manchon rempli de glace, ou d'un mélange réfrigérant, entoure la partie moyenne de l'éprouvette. Or, celle-ci ayant été remplie d'eau à 10° ou 12°, on remarque que le thermomètre supérieur reste à peu près stationnaire, tandis que le thermomètre inférieur baisse rapidement jusqu'à 4°, puis celui-ci devient stationnaire à son tour, tandis que de son côté le thermomètre supérieur se met à descendre, non seulement à 4°, mais jusqu'à zéro. On conclut de là que, tant que l'eau se refroidit jusqu'à 4°, elle va en augmentant de densité, puisqu'elle se rend à la partie inférieure de l'éprouvette, mais qu'en se refroidissant davantage elle se dilate, puisqu'elle s'élève alors vers la partie supérieure. Donc *c'est à 4° qu'elle atteint son maximum de densité.*

Fig. 565.

Expériences d'Hallström. — Plus tard, Hallström pesa successivement, dans de l'eau, à différentes températures, une boule de verre lestée avec du sable. En tenant compte de la dilatation du verre, il trouva que c'était dans de l'eau à 4°,1 que la boule subissait la poussée maximum ; par conséquent, c'était à cette température que devait avoir lieu le maximum de densité de l'eau.

Expériences de Despretz. — Despretz, par une autre méthode, s'est assuré que c'est exactement à 4° que se produit ce phénomène. Il a fait usage d'un thermomètre *à eau, c'est-à-dire contenant de* l'eau au lieu de mercure. En le refroidis-

sant graduellement dans un bain dont la température était donnée par un thermomètre à mercure, et en tenant compte de la contraction de l'enveloppe, il a trouvé que c'est à 4° qu'a lieu, dans le thermomètre à eau, le maximum de contraction, et, par suite, le maximum de densité de l'eau.

Despretz a construit une table des densités de l'eau depuis — 9° jusqu'à 100°, celle de l'eau à 4° étant prise pour unité.

Cette table fait voir que la densité de l'eau décroît très irrégulièrement de 4° à 100°, et que, par suite, il y a une variation inverse, très irrégulière, de son coefficient de dilatation.

564. **Déplacement du maximum de densité par la pression.** — *Expériences de M. Amagat.* — Les résultats qui précèdent sont relatifs à la pression *normale*. Quand la pression change, la température du maximum change aussi. D'après les expériences de M. Amagat, les plus étendues qui aient été faites sur ce sujet, cette température baisse d'à peu près 1° par 50 atmosphères de pression, de sorte que sous 200 atmosphères il n'y a plus de maximum de densité au-dessus de zéro.

Du reste, l'anomalie que présente l'eau porte non seulement sur les lois de la dilatation, mais encore sur celles de la compressibilité ; cette anomalie disparaît au fur et à mesure qu'on élève suffisamment la température ou la pression ; d'après les recherches de M. Amagat, sous une pression voisine de 5000 atmosphères, ces anomalies ont complètement disparu et l'eau est rentrée dans le cas normal des autres liquides.

565. **Maximum de densité des solutions salines.** — Despretz a démontré aussi que l'eau de mer et quelques dissolutions salines présentent l'anomalie du maximum de densité. Il a constaté que la présence des sels dissous dans l'eau abaisse la température du maximum de densité. Celle de la congélation de l'eau est également abaissée par la même cause, mais moins fortement. Ainsi l'eau de mer, qui se congèle à — (1°,70), n'a son maximum de densité qu'à — (5°,67). De même certaine dissolution de sel marin, qui se congèle à — (2°,12), n'atteint son maximum de densité qu'à — (4°,75). Il en résulte que, pour ces liquides, l'observation du maximum est assez difficile, car il faut s'arranger de manière à éviter que le changement d'état ne se produise avant le maximum de densité. On y arrive en utilisant le phénomène de *surfusion*, que nous étudierons plus loin. L'eau de la mer, qui est toujours plus ou moins agitée, se congèle toujours avant d'être assez refroidie pour atteindre son maximum de densité.

566. **Application du thermomètre à poids à la mesure des dilatations cubiques.** — Dulong et Petit ont appliqué la méthode

Fig. 566.

du thermomètre à poids à la mesure des coefficients de dilatation *cubique* des solides. Pour cela, ils prenaient un tube de verre un

peu gros, et y introduisaient la substance sous la forme d'un prisme allongé, après en avoir déterminé le poids, puis la densité à zéro. Ils étiraient ensuite l'extrémité du tube à la lampe et la recourbaient de manière à lui donner la forme d'un thermomètre à poids (fig. 566). Ils remplissaient ensuite de mercure l'espace resté libre dans le tube, et déterminaient le poids de ce liquide *qui y était contenu à zéro*. Cela fait, on portait l'appareil à une température connue t; le mercure et le corps contenus dans le tube se dilatant alors plus que le verre, il en sortait un poids p de mercure qu'on pesait.

Ils exprimaient alors que *le volume, à* t°, *du mercure sorti est égal à la dilatation du corps*, plus *celle du mercure*, moins *celle du verre*.

Soient P le poids et m le coefficient de dilatation absolue du mercure qui remplit le tube à 0°, P′ le poids de la barre métallique, x son coefficient de dilatation, et K celui du verre, d et d' les densités du mercure et du métal. On a l'équation

$$\frac{P}{d}mt + \frac{P'}{d'}xt - \left(\frac{P}{d} + \frac{P'}{d'}\right)Kt = \frac{p}{d}(1 + mt).$$

où toutes les quantités sont connues, sauf x.

Remarque. — Cette méthode ne peut évidemment s'appliquer qu'aux corps non attaquables par le mercure, tels que le fer ou certains oxydes métalliques.

CHAPITRE IV

DILATATION DES GAZ.

567. **Expériences de Gay-Lussac.** — Nous avons vu précédemment que les gaz sont les plus dilatables de tous les corps. Leur dilatation fut étudiée, presque à la même époque, par Gay-Lussac en France et par Dalton en Angleterre.

Appareil de Gay-Lussac. — Il consistait en un tube thermométrique AB (fig. 565), dont la tige avait été divisée en parties d'égale capacité. En pesant successivement le mercure contenu dans la boule A, et celui que contient la tige, on déterminait le rapport de la *capacité d'une division* de la tige à la capacité du réservoir. *Pour introduire de l'air sec* dans le tube, Gay-Lussac le remplis-

sait d'abord de mercure qu'il faisait bouillir pour chasser l'humidité. Il fixait ensuite l'extrémité de la tige, au moyen d'un bouchon, à un tube plus gros C, rempli de chlorure de calcium, substance très avide d'eau. Tenant le système des tubes AB et C dans une position verticale, le tube C en bas, il introduisait dans celui-ci et dans la tige un fil fin de platine. En l'agitant légèrement, ce fil entraînait des gouttelettes de mercure, lesquelles étaient remplacées par des bulles d'air, qui entraient par le tube C après s'être desséchées sur le chlorure de calcium. Une fois la boule et la tige remplies d'air sec, on retirait le fil de platine, en ayant soin de conserver dans la tige une petite colonne de mercure destinée à servir d'index.

Opération. — On plaçait alors le tube dans une caisse de fer-

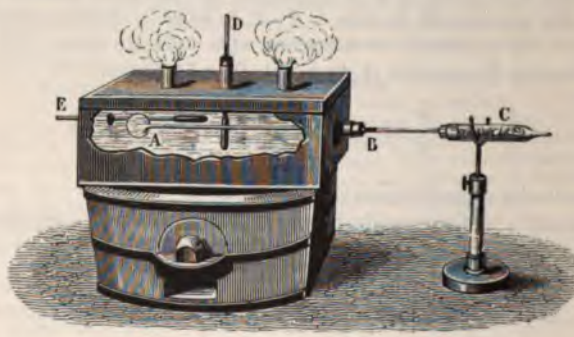


Fig. 567.

blanc (fig. 567), en faisant passer la tige dans un bouchon adapté à une tubulure latérale, et en conservant le tube à chlorure de calcium pour empêcher la rentrée de l'humidité. La caisse étant d'abord remplie de glace pilée, l'air contenu dans le réservoir se contractait, et l'index de mercure avançait dans la tige de B vers A. Notant la division de la tige où s'arrêtait l'index lorsqu'il devenait stationnaire, on avait le volume d'air à zéro contenu dans l'appareil. Quant à la pression du gaz, elle était marquée par le baromètre au moment de l'expérience. Enfin, retirant la glace et la remplaçant par de l'eau, on plaçait la caisse sur un fourneau, et l'on chauffait graduellement; des thermomètres D, E, plongés dans le bain, en donnaient les températures successives. L'air contenu dans l'appareil s'échauffant alors lentement, l'index

avançait de A vers B, et l'on avait soin, pour que tout l'air fût bien à la température du bain, d'enfoncer de plus en plus le tube dans la caisse, à mesure que l'index tendait à sortir de celle-ci. Lorsqu'on voulait arrêter l'échauffement, on fermait les portes du fourneau : la température devenait stationnaire et l'index restait immobile quelques instants. On notait alors la division correspondante de la tige, et l'on avait ainsi le volume qu'avait pris l'air à la température donnée par les thermomètres, et à la pression barométrique du moment.

Calcul de l'expérience. — Soient V le volume de l'air contenu dans l'appareil à zéro, et V' ce que devient ce volume à la température T du bain ; V' — V représente évidemment l'accroissement total du volume d'air V, lorsqu'on l'échauffe de zéro à T degrés. L'accroissement de volume, pour un seul degré et pour une seule unité de volume, est donc

$$[1] \qquad \frac{V' - V}{VT} = \alpha.$$

Remarque. — Si la pression atmosphérique a changé, et si l'on tient compte de la dilatation du verre, il y aurait lieu de faire des corrections. Soient H la pression à 0°, et H' la pression à T° ; pour ramener le volume V' à la pression H, il faut le multiplier par $\frac{H'}{H}$, et la formule ci-dessus devient

$$\alpha = \frac{V' \frac{H'}{H} - V}{VT}.$$

Or V' n'est pas le volume réel du gaz à t degrés, il n'est que le volume apparent. Le volume réel est V' (1 + KT), K étant le coefficient de dilatation cubique du verre. Portant cette valeur dans la formule, il vient enfin

$$[2] \qquad \alpha = \frac{V'(1 + KT)\frac{H'}{H} - V}{VT}.$$

Résultats généraux. — Lois de Gay-Lussac. — Gay-Lussac fut conduit aux mêmes résultats généraux que Dalton. On les énonce sous le nom de *lois de Gay-Lussac.*

1° *Tous les gaz se dilatent uniformément entre* 0° *et* 100° ;

2° *Tous les gaz ont le même coefficient de dilatation* (qui est égal à 0,00375 ou $\frac{1}{267}$) ;

3° *La dilatation des gaz est indépendante de la pression extérieure.*

Discussion des expériences de Gay-Lussac. — Rudberg, Regnault et Magnus *ont successivement* constaté que pas une des

qu'il y avait communication entre l'air
l'appareil. Dans les méthodes employé
Regnault et par divers expérimentatei
tion des gaz, ces causes d'erreur fure

568. **Formules générales relatives a**
Malgré leur défaut de rigueur, les lois
ramment employées dans la pratique
loi de Mariotte, lorsqu'il s'agit de calcul
que subit une masse de gaz dont on fa
la pression entre des limites peu éten
problèmes de ce genre qu'on peut avoir

I. *Le volume d'un gaz à 0° est* V_0; *q*
degrés, le coefficient de dilatation étant
stante?

On a évidemment

$$[1] \qquad V = V_0(1 + \alpha t)$$

Réciproquement, on a

$$[2] \qquad V_0 = \frac{V}{1 + \alpha t}.$$

II. *Connaissant le volume* V *d'un gaz*
volume V' *à t' degrés, la pression étant l*

On a d'abord le volume à 0°

$$V = \qquad V$$

ture, l'autre à la pression. Il est indifférent de commencer par l'une ou par l'autre. Imaginons d'abord que, *la température restant t°*, la pression seule varie et devienne H' : soit V_1 le volume que prendra alors la masse de gaz. Nous pouvons appliquer ici la loi de Mariotte : elle donne

$$[a] \qquad V_1 H' = VH, \qquad \text{d'où} \qquad V_1 = V\frac{H}{H'}.$$

Supposons maintenant que, *la pression restant constante et égale à* H', la température varie seule et devienne *t'* degrés : soit V' le volume que prendra alors la masse du gaz. Nous pouvons appliquer la formule précédente [3], entre l'état final et l'état intermédiaire. Elle donne

$$[b] \qquad V' = V_1 \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

En éliminant V_1, qui est une inconnue auxiliaire, entre les équations [*a*] et [*b*], il vient

$$[4] \qquad V' = V\frac{H}{H'}\,\frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t},$$

ce qu'on peut écrire

$$\frac{VH}{1 + \alpha t} = \frac{V'H'}{1 + \alpha t'},$$

c'est-à-dire

$$[4\ bis] \qquad \frac{VH}{1 + \alpha t} = \text{constante}.$$

C'est ce qu'on appelle quelquefois l'*équation des gaz parfaits*.

569. **Expériences de Regnault : Généralités et résultats.** — Les résultats généraux et les coefficients numériques relatifs à la dilatation des gaz, qui font autorité dans la science, sont dus aux recherches de Regnault. Trois méthodes de mesure ont été employées par lui; il n'a inventé, à proprement parler, aucune d'elles, mais il les a faites siennes par les perfectionnements qu'il y a apportés.

Dans une première série d'expériences, Regnault a mesuré les *coefficients moyens de dilatation* des gaz entre 0° et 100°, *sous pression constante*. C'était une répétition des expériences de Gay-Lussac. La pression constante sous laquelle il laissait dilater les gaz *était d'abord d'une atmosphère*, comme dans les expériences

de Gay-Lussac; mais il pouvait la faire varier depuis 580 millimètres de mercure jusqu'à 2620 mm.

Dans une seconde série, Regnault a mesuré les variations de pression que subit une masse de gaz quand on élève sa température de 0° à 100°, tout en *maintenant son volume constant*. Il a déduit de ces expériences de nouveaux coefficients moyens, entre 0° et 100°, qu'on désigne, à cause de leur origine, sous le nom bizarre, mais devenu classique, de *coefficients moyens de dilatation* des gaz *sous volume constant*.

Enfin, dans une troisième série d'expériences, Regnault a fait varier à la fois le volume et la pression d'une masse de gaz déterminée, en élevant sa température de 0° à 100°.

Les résultats principaux de ces expériences sont les suivants.

I. *Coefficients de dilatation moyens* entre 0° et 100° *sous pression constante :*

Air atmosphérique	0,003670
Hydrogène	0,003661
Acide carbonique	0,003710
Acide sulfureux	0,003903

On voit que le coefficient moyen de l'hydrogène est plus petit que celui de l'air, et que tous les autres coefficients sont plus grands; et ils s'en écartent d'autant plus que les gaz sont plus rapprochés de leur point de liquéfaction.

En outre, ces coefficients moyens, mesurés sous diverses pressions, augmentent rapidement à mesure que les pressions s'élèvent. Cette augmentation est d'autant plus sensible que les gaz sont plus liquéfiables. C'est ce qui résulte du tableau suivant :

PRESSIONS	AIR ATMOSPHÉRIQUE	HYDROGÈNE	ACIDE CARBONIQUE	ACIDE SULFUREUX
360mm	0,003650	—	—	—
760	0,003670	0,003661	0,003710	0,003902
980	—	—	—	0,003980
2520	—	—	0,003846	—
2545	—	0,003662	—	—
2565	0.003697	—	—	—
2620	0,003696	—	—	—

II. *Coefficients de dilatation moyens*, entre 0° et 100°, *à volume constant.* — Le coefficient moyen de dilatation α_1 *à volume constant*, déterminé en prenant pour pression initiale la pression

atmosphérique, *n'est pas le même pour tous les gaz*. Cela résulte du tableau suivant :

Air atmosphérique	0,003665
Hydrogène	0,003667
Oxyde de carbone	0,003667
Acide carbonique	0,003688
Protoxyde d'azote	0,003676
Cyanogène	0,003829
Acide sulfureux	0,003845

Si l'on compare ce tableau au précédent, on voit que les coefficients α et α_1 pour un même gaz, sont différents ; α_1 *est* généralement *plus petit que* α (sauf pour l'hydrogène). Ces divergences tiennent aux écarts que présentent les lois de compressibilité de ces gaz par rapport à la loi Mariotte.

En outre, le coefficient α_1 va en croissant pour un même gaz, comme le coefficient α, lorsqu'on augmente la valeur de la pression initiale. C'est ce qui résulte du tableau suivant :

PRESSIONS INITIALES	AIR ATMOSPHÉRIQUE	ACIDE CARBONIQUE
110mm	0,003648	—
375	0,003659	—
758	—	0,003686
760	0,003665	—
1692	0,003680	—
1743	—	0,003752
3589	—	0,003860
3657	0,003709	—

570. Expériences de Regnault : Dilatation sous pression constante. — 1° *Description de l'appareil.* — Le ballon de Gay-Lussac A (fig. 568), muni d'un ajutage latéral qui permet d'y faire le vide ou d'y introduire le gaz à volonté, et le *manomètre Regnault* MNR sont les deux pièces principales de l'appareil de Regnault. Le tube MN du manomètre, ainsi que le tube capillaire qui le relie au ballon, ont été jaugés et gradués avec soin : on en connaît le volume dans toutes leurs parties. Une étuve à eau B permet de porter le ballon à la température de l'eau bouillante. Un manchon L, dans lequel on peut faire circuler d'une manière continue les eaux de la ville, permet de maintenir les deux branches du manomètre à une température constante. Enfin la série T de tubes en U, reliés au col du ballon par l'intermédiaire du tube D en forme de T, sert à introduire dans l'appareil des gaz parfaitement desséchés et purifiés.

2° *Marche de l'opération.* — On opère d'abord à 0° ; l'étuve est remplie de glace fondante, et l'on remplit le ballon du gaz, sec et pur. Les niveaux du mercure sont amenés en M et L, sur le même plan horizontal, dans les deux branches du manomètre. *On note le volume initial* occupé par le gaz, à savoir la capacité *V du ballon, et la capacité v du tube de jonction et de la partie supérieu*

du manomètre jusqu'en M. On note aussi la pression atmosphérique du moment H, ainsi que la température ambiante t (nous la supposons différente de θ, température de l'eau qui circule autour du manomètre).

On porte ensuite le ballon à T° dans l'étuve (température de la vapeur d'eau bouillante). Le gaz se dilate, sa pression augmente en même temps que sa température, et le niveau du mercure monte dans la grande branche du manomètre. On laisse alors couler du mercure, à l'aide du robinet à trois voies R, usqu'à ce que les deux niveaux soient ramenés en N, sur le même plan hori-

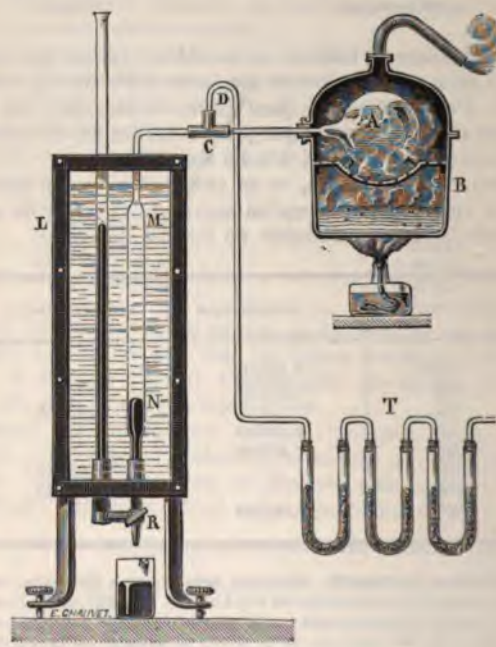


Fig. 568.

zontal. On note alors la température T de l'étuve, la pression extérieure H' qui peut être légèrement différente de H, ainsi que la température ambiante t'; enfin, on mesure avec précision le volume u, égal à MN, qui représente la dilatation du gaz.

3° *Calcul de l'expérience.* — On peut raisonner de deux manières pour établir l'équation de l'expérience ; ou bien l'on peut ramener à 0° le volume total *occupé par le gaz*, dans l'une ou l'autre des phases de l'expérience ; ou bien l'on *peut appliquer* directement au gaz, pour chacune de ces phases de l'expérience, *la formule* des gaz parfaits (568, III). Contentons-nous ici de ce dernier procédé. — *Soient* α le coefficient inconnu du gaz, et K celui du verre.

Dans la première phase, on a deux masses de gaz à même pression H, mais à deux températures différentes 0° et t. On a donc

$$\frac{VH}{1} + \frac{vH}{1+\alpha t} \quad \text{ou} \quad \left(V + \frac{v}{1+\alpha t}\right) H = \text{constante}.$$

Dans la deuxième phase, on a les deux mêmes masses de gaz, à la même pression H', mais à trois températures distinctes, T, t' et θ. On a donc

$$\frac{V(1+KT)H'}{1+\alpha T} + \frac{vH'}{1+\alpha t'} + \frac{uH'}{1+\alpha\theta} = \text{constante}.$$

En égalant les deux premiers membres de ces deux égalités, il vient

$$[1] \qquad \left(V + \frac{v}{1+\alpha t}\right) H = \left[\frac{V(1+KT)}{1+\alpha T} + \frac{v}{1+\alpha t'} + \frac{u}{1+\alpha\theta}\right] H'.$$

Remarquons que, H et H' étant fort peu différents l'un de l'autre, l'application de la loi de Mariotte est ici parfaitement légitime.

4° *Résolution de l'équation.* — L'inconnue α est engagée dans une équation qui serait du *quatrième degré* ou tout au moins du *troisième degré* (si l'on négligeait la différence entre les températures t et t'). On ne peut donc pas la résoudre directement. Regnault en dégageait les racines en lui appliquant la *méthode des approximations successives.* De l'équation précédente il dégageait le binôme $1 + \alpha T$. On avait

$$[2] \qquad 1 + \alpha T = \frac{H'(1+KT)}{H + \frac{v}{V}\cdot\frac{H}{1+\alpha t} - \frac{v}{V}\cdot\frac{H'}{1+\alpha t'} - \frac{u}{V}\cdot\frac{H'}{1+\alpha\theta}}.$$

En se servant d'une première valeur approchée de α, par exemple du coefficient de Gay-Lussac 0,00375, on calculait d'abord le dénominateur du second membre, ce qui permettait d'obtenir une première valeur approchée du binôme $1 + \alpha T$ et, par suite, de α. Soit α', cette première valeur approchée.

En substituant cette première valeur α' dans le second membre de la formule, on pourra calculer une nouvelle valeur α'' plus approchée que la première. On obtiendra de la sorte une série de valeurs α', α'', α'''..., de plus en plus approchées et de plus en plus voisines l'une de l'autre. On s'arrêtera lorsque la différence entre deux valeurs consécutives de la série sera d'un ordre de grandeur inférieur à celui des erreurs d'expérience probables.

5° *Résultats.* — Les résultats de cette série d'expériences ont été exposés précédemment (568, I).

571. **Expériences de Regnault : Dilatation à volume constant.** — Regnault a étudié la dilatation des gaz *à volume constant*, — c'est-à-dire les *variations de pression* qu'ils subissent lorsqu'on les chauffe, *sans les laisser dilater*, — par un procédé dû au physicien suédois Rudberg.

1° *Description de l'appareil.* — Le gaz est contenu dans un ballon de verre A de près d'un litre de capacité (fig. 569). Au col du ballon est soudé un tube à petit diamètre b, qui va s'engager dans une tubulure métallique à trois branches o. Dans la seconde branche est mastiqué un tube de verre d, sur lequel est appliqué un tuyau de caoutchouc qui met le ballon en communication avec des tubes desséchants et avec une pompe à main P ; à la troisième branche est adapté un tube de verre c, qui va se souder au même manomètre à air libre BC décrit précédemment. En a, sur le tube B, est un trait de repère auquel on

soin de ramener toujours le niveau du mercure dans les deux tubes (soit qu'on en verse par le tube C, soit qu'on en fasse écouler par le robinet E).

Le ballon A est placé dans une petite chaudière de laiton D, qui sert d'étuve, qu'on peut élever ou abaisser plus ou moins le long d'un support vertical; on la fixe par une vis de pression T : on peut aussi la faire glisser latéralement sur deux supports horizontaux pour raccorder le tube *b* avec le manomètre.

2° *Marche des expériences. — Remplissage du ballon.* — Il s'agissait d'abord de remplir le ballon A d'air sec. Pour cela, ayant tourné le robinet E de manière à fermer la branche B du manomètre, on porte le ballon à la température de 100° en faisant bouillir, à l'aide d'une lampe à alcool, de l'eau placée dans la chaudière. Celle-ci est alors fermée par un double couvercle entre les parois

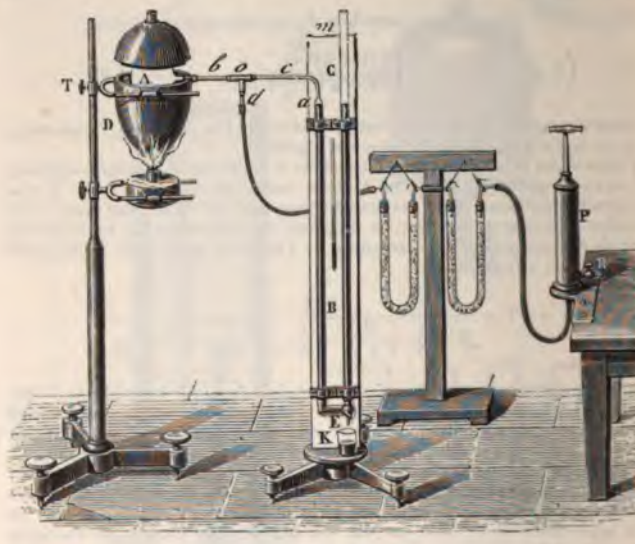


Fig. 569.

duquel circule la vapeur avant de se dégager par une tubulure placée au sommet. Puis on fait le vide un grand nombre de fois à l'aide de la pompe à main P, et on laisse rentrer l'air chaque fois par les tubes desséchants. Regnault répétait cette opération jusqu'à 30 fois de suite.

Première phase. — Une fois le ballon rempli d'air sec, on retire l'eau de la chaudière, qu'on laisse refroidir, puis on la remplit de glace pilée. Le ballon se refroidissant jusqu'à 0°, le gaz se contracte, et une nouvelle quantité d'air sec entre par les tubes desséchants. L'air du ballon étant alors à 0°, l'air contenu dans les tubes *bc* étant à la température ambiante *t*, donnée par un thermomètre fixé sur l'appareil, et le mercure restant au niveau *a* dans les tubes, on enlève le tube de caoutchouc, et l'on ferme à la lampe le tube *d*. On observe en même temps la pression H marquée par le baromètre : cette pression est celle de l'air qu'on vient de renfermer dans l'appareil.

Deuxième phase. — On retire la glace de la chaudière, et l'on y remet de l'eau distillée qu'on porte encore à l'ébullition, en ayant soin de tourner le robinet E de façon que les tubes manométriques B et C communiquent alors entre eux. La force élastique de l'air dans l'appareil augmentant avec la température, le niveau du mercure tend à baisser dans le tube B et à monter dans le tube C; mais si dans celui-ci on verse graduellement du mercure, l'excès de pression qui en résulte fait équilibre à l'accroissement de la force élastique de l'air, et le niveau se maintient constant dans la branche B, au point de repère a. Lorsque le gaz cesse de se dilater, on mesure la hauteur du mercure qu'on a versé dans le tube C. En la représentant par h, et par H' la hauteur barométrique au même moment, la masse d'air, qui était d'abord à la pression H, est maintenant à la pression $H' + h$. Quant à la température finale T du ballon, elle est égale à celle de la vapeur dans la chaudière. Or on trouve dans des *tables des forces élastiques de la vapeur d'eau* les températures correspondantes aux pressions qu'elle supporte. Il suffit donc de prendre la hauteur H' du baromètre à la fin de l'expérience pour en déduire, au moyen de ces tables, la valeur de T.

3° *Calcul de l'expérience.* — Le ballon, ainsi que les tubes b et c, ont été jaugés d'avance : on les a pesés pleins de mercure. Soient V la capacité du ballon à 0°, v celle des tubes b et c à la température ambiante t pendant la première partie de l'expérience, K le coefficient de dilatation du verre, et α celui de l'air ou du gaz essayé. Le volume d'air v ramené à 0° devient $\frac{v}{1+\alpha t}$ (en négligeant la dilatation du verre, ce qui n'altère pas le résultat, v étant très petit). Le volume total de l'air dans la première phase de l'expérience est donc $V + \frac{v}{1+\alpha t}$, à 0° et sous la pression H.

A la fin de la deuxième phase, l'air du ballon étant à T degrés, son volume est $V(1+KT)$ à cause de la dilatation du verre : ramené à 0°, ce volume de gaz est $\frac{V(1+KT)}{1+\alpha T}$. Quant au volume v, en supposant que la température ambiante ait changé et soit devenue t', il est, à 0°, $\frac{v}{1+\alpha t'}$. Le volume total de l'air à 0° et à la pression $H' + h$ est donc dans le second cas

$$\frac{V(1+KT)}{1+\alpha T} + \frac{v}{1+\alpha t'}.$$

Or on a vu que pour une même masse de gaz, à température égale, le produit du volume par la pression est constant. On a donc l'équation

$$\left\{ V\frac{1+KT}{1+\alpha T} + \frac{v}{1+\alpha t'} \right\}(H'+h) = \left(V + \frac{v}{1+\alpha t}\right) H.$$

4° *Calcul et résultats.* — Cette équation a été résolue comme la précédente par la méthode des *approximations successives*. Les résultats de cette série d'expériences ont été indiqués précédemment (568, II).

572. Expériences de Regnault : Dilatation à volume et sous pression variables. — La dilatation des gaz, quand on laisse varier à la fois leur volume et leur pression, a été étudiée à l'aide d'un procédé de Dulong et Petit dont Regnault a beaucoup perfectionné la manipulation.

1° *Description de l'appareil et marche de l'expérience.* — L'appareil de Regnault se compose d'un réservoir de verre B (fig. 570), qu'on a préalablement jaugé au mercure, et dont on a d'avance déterminé le coefficient de dilatation cubique. Un tube de verre de petit diamètre est soudé au réservoir B.

Remplissage à l'air sec. — On remplit ce réservoir d'air parfaitement sec en opérant comme dans les expériences précédentes (570).

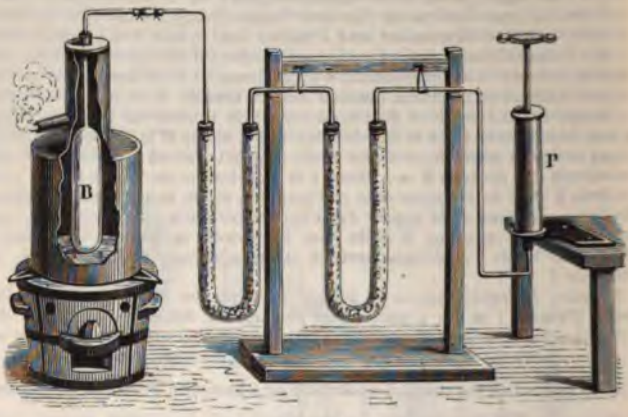


Fig. 570.

Cela fait, on laisse, pendant environ une demi-heure, l'air du réservoir prendre la température de la vapeur, puis on enlève les tubes desséchants, et on ferme à la lampe l'extrémité du cube capillaire, en ayant soin de noter en même temps la hauteur H du baromètre. Le réservoir B étant refroidi, on le place dans un appareil (fig. 571) qui permet de l'entourer complètement de glace, et l'on plonge l'extrémité du tube dans une cuvette C remplie de mercure. Lorsque le réservoir B est à zéro, on casse avec une petite pince la pointe *b*; l'air intérieur s'étant condensé, le mercure de la cuvette pénètre dans le réservoir par l'effet de la pression atmosphérique, et s'élève à une hauteur *oG* telle, qu'ajoutée à la tension de l'air dans l'appareil, elle fasse équilibre à la pression atmosphérique [1].

Fig. 571.

1. Pour éviter que de l'air, passant entre le mercure et la paroi extérieure du tube, ne soit entraîné avec le mercure et ne pénètre dans le réservoir, Regnault versait sur le mercure de la cuvette une légère couche d'acide sulfurique et il engageait la pointe effilée *b* dans de petits disques de laiton, percés à leur centre. Ces *disques*, étant mouillés par le mercure, qui les attaque, barrent le passage *à l'air*.

On mesure *au cathétomètre* la hauteur h de la colonne de mercure Go, en utilisant le dispositif de la pointe d'affleurement *go*.

Enfin, on ferme la pointe effilée b au moyen d'une petite cuiller a, qui d'avance a été remplie de cire molle, et qu'on peut à volonté faire avancer vers la pointe b jusqu'à ce qu'on ait engagé celle-ci dans la cire et qu'on l'ait bouchée complétement. A ce moment, on note la pression indiquée par le baromètre : en la représentant par H', la pression de l'air, dans le réservoir B, est exprimée par $H' - h$.

Ces mesures prises, on retire le réservoir de la glace, on l'essuie et on le pèse pour obtenir le poids et par suite le volume du mercure qui s'y est introduit; ce volume étant connu, on en déduit celui de l'air à zéro.

2° *Calcul de l'expérience.* — Soient, à 0°, P le poids du mercure qui passe dans le réservoir et dans le tube quand on casse la pointe b, P' le poids du mercure qu'ils contiennent, à 0°, lorsqu'ils sont pleins, D la densité du mercure, K le coefficient de dilatation cubique du verre dont le réservoir est formé, et α le coefficient de dilatation de l'air; soient, en outre, H' la hauteur du baromètre au moment où l'on bouche avec de la cire la pointe b du tube capillaire, H la hauteur du baromètre quand on ferme l'appareil à la lampe, et t la température du réservoir B au même instant. La capacité de ce réservoir et du tube à 0° est $\frac{P'}{D}$, et à t degrés elle est $\frac{P'}{D}(1 + Kt)$. Tel était donc aussi le volume d'air à t degrés et sous la pression H quand on a fermé l'appareil; ramené à la pression 760, ce volume est enfin

$$[1] \qquad \frac{P'(1 + Kt)H}{D \cdot 760}.$$

D'un autre côté, le volume d'air, dans le réservoir refroidi à 0°, est $\frac{P' - P}{D}$ à la pression $H' - h$. A la pression 760 et à t degrés, ce volume devient

$$[2] \qquad \frac{(P' - P)(1 + \alpha t)(H' - h)}{D \cdot 760}.$$

Mais les formules [1] et [2] représentent l'une et l'autre le volume, à t degrés et sous la pression 760, de l'air contenu dans le réservoir et dans le tube; on peut donc les égaler, ce qui donne, en supprimant le dénominateur commun, l'équation

$$[3] \qquad P'(1 + Kt)H = (P' - P)(1 + \alpha t)(H' - h),$$

d'où l'on déduit la valeur de α.

573. **Expériences de M. Amagat : Lois générales.** — Les coefficients sous pression constante et sous volume constant varient avec la pression et avec la température ; voici les lois résultant des recherches de M. Amagat.

I. *Coefficients sous pression constante. — Variation avec la température.* — Les coefficients sous pression constante varient avec les limites de température auxquelles ils se rapportent : c'est ce qui résulte du tableau suivant :

Acide sulfureux.		*Acide carbonique.*	
De 10° à 60°	0,003904	De 0° à 50°	0,003714
10° à 100°	0,003863	0° à 100°	0,003711
10° à 150°	0,003832	0° à 150°	0,003706
10° à 200°	0,003812	0° à 200°	0,003704
10° à 250°	0,003798	0° à 250°	0,003705

Ces valeurs sont rapportées aux températures du thermomètre à air.

Ces variations, de même que celles relatives à la pression, sont d'autant plus considérables que les gaz sont plus facilement liquéfiables.

La pression croissant, le coefficient (à une température ou entre des limites données) augmente d'abord, passe par un maximum, puis diminue; ce maximum a lieu sous une pression d'autant plus forte que la température est plus élevée.

(Par exemple, pour l'*acide carbonique*, le maximum entre 40° et 50° (0,07566) a lieu sous 90 atm., tandis qu'entre 100° et 137° (0.00945) il a lieu sous 400 atm. Par exemple encore, sous 3000 atm. le coefficient de l'hydrogène entre 0° et 47° (0,00125) est presque trois fois plus petit que sous la pression normale : il est à peine supérieur à celui de l'alcool sous cette même pression.)

2° La température croissant, le coefficient (pour une pression donnée) augmente, passe par un maximum, puis diminue; ce maximum a lieu à une température d'autant plus élevée que la pression est plus forte. Après ce maximum, et à une température suffisamment élevée, l'accroissement de volume devient sensiblement proportionnel à l'accroissement de température.

(Par exemple, pour l'acide carbonique, le maximum sous la pression de 100 atm. (0,05899) a lieu entre 40° et 50°, tandis que sous la pression de 250 atm. (0,00865) il a lieu entre 90° et 100°.)

Les lois réglant la position de ces deux ordres de maximum sont plus compliquées.

II. *Coefficients à volume constant.* — 1° La pression augmentant, le coefficient (pour des limites données de température) croît et passe par un maximum d'autant moins prononcé que la température est plus élevée.

2° Pour des températures croissantes le coefficient est sensiblement en raison de la pression moyenne et par suite diminue continuellement.

Remarque. — Dans ces énoncés, le coefficient entre des limites données de température, ou à une température donnée, est entendu dans le sens de la définition donnée (n° 562, 1°) à propos de la dilatation des liquides.

CHAPITRE V

APPLICATIONS DE LA DILATATION DES GAZ.

THERMOMÈTRES A GAZ. — THERMOMÉTRIE DE PRÉCISION. — DENSITÉS DES GAZ.

574. **Défaut de comparabilité des différents thermomètres.** — Tous les thermomètres à liquides ou à solides, dont on a déterminé les points fixes 0° et 100°, seront nécessairement toujours *d'accord* pour ces deux températures-limites. Mais il n'y a pas de raison pour que ces instruments restent d'accord à tous les degrés de l'échelle des températures. Pour qu'un thermomètre à alcool ou un thermomètre métallique indiquât, par exemple, 20° dans un milieu où le thermomètre à mercure marque 20°, il faudrait que le mercure, l'alcool et le métal subissent, dans les mêmes circonstances, les $\frac{20}{100}$ de leur dilatation totale entre 0° et 100°, ce qui ne pourrait avoir lieu que si les deux liquides et le métal *avaient exactement* la même loi de dilatation. Or l'étude générale des dilatations nous a prouvé que deux corps quelconques, solides, liquides ou gazeux, *n'obéissent jamais* rigoureusement à la même loi de dilatation. Par conséquent, *la mesure d'une température quelconque*, autre que 0° et 100°, n'aura de signi-

fication précise qu'autant qu'on indiquera en même temps la nature du thermomètre qui a servi à la mesurer.

575. **Choix de la substance thermométrique.** — *Thermomètres à gaz.* — Les gaz ont, comme *substance thermométrique*, une supériorité évidente sur les liquides — et, *à fortiori*, sur les solides — au point de vue de la *sensibilité*, puisque leur coefficient de dilatation est beaucoup plus grand. Ils leur sont encore supérieurs au point de vue de la *comparabilité*. De cette grandeur même de leur coefficient il résulte que les petites différences qui existent entre les dilatations des diverses enveloppes de verre deviennent complètement négligeables. Par conséquent, deux thermomètres construits avec le même gaz seront toujours *comparables entre eux*, quelles que soient les différences du verre de leurs enveloppes, et un même thermomètre à gaz restera toujours *comparable à lui-même*.

C'est donc un gaz qu'il faut choisir, de préférence à un liquide et à un solide, pour mesurer les températures avec précision.

576. **Principes de la thermométrie de précision.** — Choisissons comme corps thermométrique une masse gazeuse A, de nature déterminée, enfermée dans un récipient de volume *invariable*, et comme *élément thermoscopique*, c'est-à-dire comme facteur variable avec la température, la force élastique du gaz.

Il n'y a pas ici de *loi physique* pouvant servir de définition à cette mesure; on y supplée en liant la mesure de la température t à celle de la force élastique p_t de la masse A par une équation arbitraire.

On a choisi la plus simple : l'équation du premier degré entre p et t.

Posons donc

$$[1] \qquad p_t = a + bt.$$

Désormais, *l'échelle thermométrique est fixée* : c'est l'*échelle linéaire*.

Mais il faut encore déterminer les constantes a et b de la formule, c'est-à-dire le *système thermométrique*. Nous avons vu qu'on y arrive, dans le *système centigrade*, qui est le plus employé, en désignant *conventionnellement* par les nombres 0 et 100 les points fixes relatifs à la fusion de la glace et à l'ébullition de l'eau sous la *pression normale*.

Si p_0 et p_{100} sont les pressions correspondantes de la masse A, relevées au manomètre, on a, d'après l'équation [1],

$$[2] \qquad p_0 = a, \qquad p_{100} = a + 100\,b,$$

d'où l'on tire

$$b = \frac{p_{100} - p_0}{100}$$

et par suite

$$[3] \qquad p_t = p_0 + \frac{p_{100} - p_0}{100}\,t; \quad \text{d'où} \quad t = \frac{p_t - p_0}{\dfrac{p_{100} - p_0}{100}}. \qquad [4]$$

L'équation [4] montre que l'on prend comme *unité de température* la variation de température qui entraîne une variation de pression $\frac{p_{100} - p_0}{100}$ dans la masse gazeuse qui *charge* le thermomètre.

L'équation [3] peut s'écrire encore

$$p_t = p_0\left(1 + \frac{p_{100} - p_0}{100\,p_0}\,t\right) \qquad \text{ou} \qquad p_t = p_0(1 + \beta t),$$

en posant

$$\beta = \frac{p_{100} - p_0}{100\,p_0}.$$

La *constante* β a reçu le nom de *coefficient thermométrique* de l'appareil.

Thermomètre normal du Bureau international des Poids et Mesures. — Le thermomètre étalon, installé à Sèvres (pavillon de Breteuil) par M. Chapuis, a été chargé d'hydrogène à 0° sous la pression qui correspond à 1 mètre de mercure.

Le coefficient β de ce thermomètre a été trouvé égal à 0,00566254.

Le réservoir à gaz TT' est un cylindre de platine ayant une capacité de 1058,99 cm³ à 0°. Il est relié au manomètre *nn'* par un tube de petit diamètre *t*.

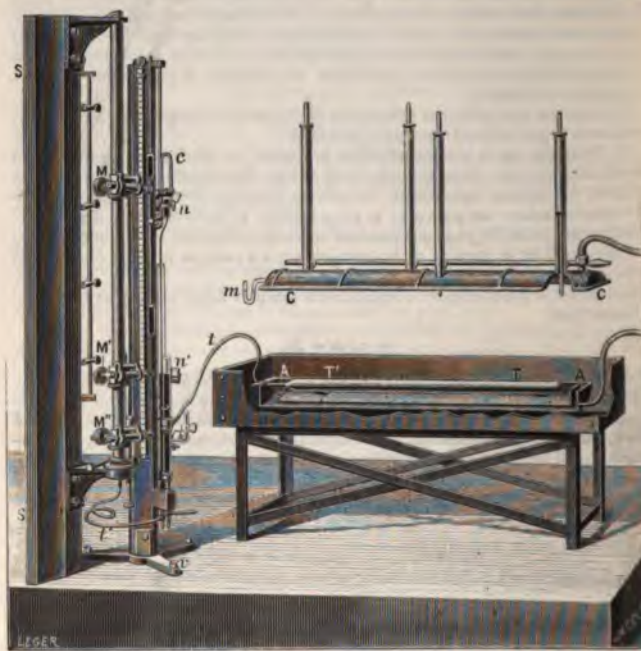


Fig. 572.

Les hauteurs de mercure dans le manomètre sont relevées à l'aide de microscopes M, M', M'', comme dans un comparateur.

En fait, l'*équation thermométrique* [3] est un peu compliquée ici par la dilatation du récipient et par l'existence d'un *espace nuisible* constitué par le petit tube qui transmet la pression du gaz au manomètre (fig. 572). On a, en tenant compte de ces conditions, l'équation complète

$$[3\ bis] \qquad \left(V_0 + \frac{v}{1+\beta t}\right) p_0 = \left[\frac{V_0(1+K_T)}{1+\beta T} + \frac{v'}{1+\beta t'}\right] p_T.$$

V_0 *représente le* volume du récipient à zéro, v et v' les volumes de l'espace

nuisible aux températures ambiantes t et t', K_T est la dilatation spécifique du récipient pour l'*intervalle* de températures $(t' - T)^0$.

Remarque. — Il résulte de l'étude de la dilatation des gaz que des thermomètres chargés de gaz différents, sous des pressions variables, sont encore *comparables* dans de larges limites; et ils restent aussi *comparables* à eux-mêmes, si on les consulte en maintenant la pression constante et en prenant le volume comme élément thermoscopique.

577. **Thermomètres à mercure.** — En substituant, comme nous l'avons fait au début, le mercure au gaz comme corps thermométrique et la mesure de la dilatation apparente à celle d'une force élastique, on a construit des thermomètres très pratiques.

On définit alors t par l'équation

$$V_0 + nv_0 = a + bt,$$

V_0 et v_0 étant les volumes, dans la glace fondante, du réservoir et de la division du tube gradué qui le surmonte : n exprime la dernière division occupée par le mercure lorsque l'instrument est dans l'enceinte donnée.

On a, dans ce cas, pour déterminer les coefficients a et b dans le système centigrade,

$$V_0 + n_0 v_0 = a, \qquad V_0 + n_{100} v_0 = a + 100\,b;$$

d'où

[4 *bis*] $$t = \frac{n}{\dfrac{n_{100} - n_0}{100}}.$$

L'unité de température, dans ce cas, est la 100e partie de l'élévation de température nécessaire à la production de la dilatation apparente $(n_{100} - n_0)\,v_0$.

578. **Comparaison du thermomètre à air normal avec le thermomètre à mercure normal.** — Le thermomètre à air présente un grand inconvénient au point de vue pratique : c'est la difficulté et la longueur des manipulations que chaque opération exige. Aussi, malgré sa précision, est-il beaucoup moins employé dans la pratique que le *thermomètre à mercure*. C'est celui-ci qui est le véritable *thermomètre normal usuel*.

A priori les indications des deux thermomètres sont indépendantes. Toutefois il se trouve que les thermomètres à mercure convenablement consultés non seulement sont sensiblement comparables entre eux, mais sont encore comparables avec le thermomètre normal (thermomètre à gaz consulté à pression constante).

Ils correspondent tous deux au même degré : le degré centigrade, *nouvelle unité fondamentale* qui doit prendre place à côté du centimètre, du gramme et de la seconde dans le système C. G. S. Ce système se trouve par là étendu aux grandeurs thermiques.

Le degré étant ainsi nettement défini, on a pu se proposer les problèmes étudiés ci-dessus, à savoir de trouver les lois qui lient une longueur, un volume, une force élastique, etc., à la température.

DENSITÉ DES GAZ.

579. **Définition. — Méthode générale de détermination.** — On appelle *densité* d'un gaz le *rapport* du poids d'un certain volume de ce gaz à celui d'un même volume d'air, — le gaz et l'air *étant tous les deux à 0° C et sous la pression de 76 centimètres.*

Pour mesurer la densité d'un gaz, on prendra un ballon de verre de 8 à 10 litres de capacité, dont le col porte un robinet pouvant se visser sur la machine pneumatique. On pèsera ce ballon successivement vide, plein d'air et plein du gaz dont on cherche la densité, l'air et le gaz étant purifiés et desséchés. En soustrayant du poids obtenu dans les deux dernières pesées celui du ballon, on aura le poids de l'air et le poids du gaz sous le même volume.

Si, durant ces différentes pesées, la température restait constamment égale à 0° et la pression à 76 centimètres, il n'y aurait qu'à diviser le poids du gaz par le poids de l'air, et le quotient serait la densité cherchée. Mais, comme ces conditions de température et de pression ne sont pas ordinairement réalisées pendant la durée de ces expériences, il est nécessaire d'effectuer plusieurs corrections pour ramener les poids des deux gaz aux conditions normales de température et de pression.

C'est ce que firent Dumas et Boussingault, qui appliquèrent les premiers cette méthode générale.

580. **Méthode de Regnault.** — Quelque soin qu'on apporte dans les corrections, elles ne laissent pas d'être incertaines. Regnault perfectionna le procédé en opérant dans des conditions expérimentales qui supprimaient la plupart des causes d'erreur et rendaient les corrections inutiles.

Emploi du ballon compensateur ou ballon-tare. — On prend deux ballons à long col, faits du même verre et ayant des volumes extérieurs *sensiblement égaux*; puis on ferme le plus grand par une tubulure à robinet, et le plus petit par une simple tubulure à crochet. Pour vérifier si les volumes des ballons sont identiques, on les remplit d'eau et on les suspend aux plateaux d'une balance, en ayant soin d'établir l'équilibre au moyen d'une tare. Si on les fait ensuite plonger dans une cuve remplie d'eau, l'équilibre est généralement rompu, et le nombre de grammes q qu'il faut ajouter pour le rétablir représente, en centimètres cubes, la différence des volumes des ballons. On prépare alors un tube de verre fermé dont le volume extérieur soit de q centimètres et on le suspend au crochet du plus petit ballon.

Remplissage du ballon à 0°. — Afin d'éviter les corrections de dilatation du verre et des gaz sur lesquels on expérimente, on a soin de remplir le ballon à robinet soit du gaz, soit d'air à zéro. Pour cela le ballon est placé dans un vase plein de glace (fig. 573); puis on visse sur le robinet B un second robinet A, à l'aide duquel on peut faire communiquer à volonté le ballon soit avec une machine pneumatique, par un tube de caoutchouc D, soit avec les tubes M, N, dans lesquels le gaz est amené par un tube C. Les tubes M, N contiennent différentes substances, destinées les unes à dessécher le gaz, les autres à le purifier.

Après un premier remplissage, on fait le vide dans le ballon, puis on le remplit de nouveau, et cela plusieurs fois de suite, de manière à être assuré de n'y laisser que du gaz parfaitement pur.

Tare et pesée des gaz. — On ferme alors le robinet B, et dévissant le robinet A, on retire le ballon de la glace, on l'essuie avec soin, on le laisse reprendre peu à peu la température ambiante, de manière qu'il ne condense plus de va-

peur d'eau sur ses parois, puis on le porte dans la balance décrite ci-dessus et l'on en fait la tare, en se servant du *ballon compensateur*. On reporte ensuite le ballon dans la glace et l'on y fait le vide aussi complètement que possible. Il n'y reste qu'un faible résidu gazeux, à la pression h, qu'on lit sur un baromètre différentiel, communiquant avec l'appareil par l'intermédiaire du tube E, et on le reporte sous le même plateau de la balance. Le fléau s'incline alors du côté opposé et pour rétablir l'équilibre il faut ajouter au plateau un poids p. Ce poids représente évidemment le poids du gaz contenu dans le ballon, à 0° et sous la pression $H - h$.

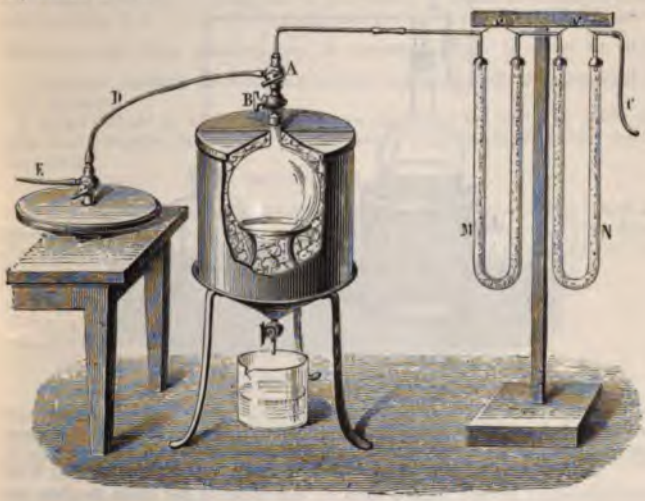


Fig. 573.

Calcul de l'expérience. — Pour déterminer le poids G qu'aurait un même volume de ce gaz à la pression 760, on a, d'après la loi de Mariotte,

$$\frac{G}{p} = \frac{760}{H - h}, \qquad \text{d'où} \qquad G = p \times \frac{760}{H - h}.$$

On recommence les mêmes pesées sur l'air, dans le même ballon : on trouve que le poids d'air, qui y est contenu à 0° et sous la pression 760, est donné, en fonction du poids p', déterminé directement, par la même formule

$$A = p' \times \frac{760}{H' - h'}.$$

Si l'on divise le poids du gaz par le poids de l'air, on obtient la densité cherchée

$$D = \frac{G}{A} = \frac{p}{p'} \times \frac{H' - h'}{H - h}.$$

581. **Densité des gaz qui attaquent le cuivre.** — Pour les gaz qui attaquent le cuivre, comme le chlore, on prend un flacon bouché à l'émeri, dont on détermine d'avance la capacité en le jaugeant à l'eau (fig. 574). On le remplit du gaz pur et sec par simple déplacement de l'air. On évalue alors par une double

Fig. 574.

pesée l'excès $P - p$ du poids du gaz sur celui de l'air à volume égal. Or, la capacité du flacon étant connue, on en déduit le poids de l'air qu'il contient, et ce poids, ajouté à la différence $P - p$, est le poids du gaz. Il ne reste donc plus qu'à diviser ce poids par celui de l'air, en ayant soin toutefois de faire les corrections de température et de pression nécessaires pour ramener les deux poids au même volume, à la température de 0° et sous la pression de 76 cm.

Fig. 575.

582. **Nouvelles expériences de M. A. Leduc.** — M. A. Leduc a repris récemment toutes les mesures de Regnault relatives à la densité des gaz, en simplifiant sa méthode tout en y apportant les perfectionnements suivants :

1° Mesure de la pression atmosphérique et de la pression résiduelle au moyen d'appareils perfectionnés (178).

2° Pesées au *dixième de milligramme* à l'aide de la balance Collot (92) ; ce qui lui a permis de réduire de 10 litres à 2 litres environ les dimensions du ballon à gaz.

3° Emploi d'un ballon de verre à *robinet de verre* (fig. 575) sans garniture métallique et sans mastic (les inconvénients du mastic sont faciles à deviner). Ce nouveau ballon permet de déterminer la densité du chlore et des gaz acides aussi bien que celle des gaz neutres.

4° Le vide étant fait avec une machine à mercure, le ballon est taré successivement vide, puis plein de gaz et vide de nouveau : on élimine aussi l'influence des pertes de poids du ballon dues aux essuyages successifs.

5° *Enfin M.* Leduc tient compte de ce que le ballon subit une légère contrac-

tion quand on y fait le vide, ce qui correspond à une diminution de la poussée atmosphérique de 0,2 mmg par litre environ.

Il a trouvé, par cette méthode, des nombres sensiblement différents de ceux admis jusqu'ici.

Oxygène. . . .	1,1050	Azote	0,9720
Hydrogène. . .	0,06947	Protoxyde d'azote.	1,0587

583. Détermination du poids du litre d'air normal. — *Méthode de Regnault.* — Après avoir déterminé le poids d'air A qui remplit le ballon 0° et sous la pression normale, il ne restait plus qu'à déterminer le volume V de ce ballon pour déduire de ces deux nombres, par la formule $a_0 = \frac{A}{V}$, le poids du litre d'air normal. Regnault effectua cette dernière mesure à l'aide d'un *jaugeage à l'eau distillée.*

Il tarait d'abord le ballon, rempli d'eau distillée à 0°. Soit M le poids de cette eau, B le poids du verre et ϖ la poussée : l'équation de ce premier équilibre était

$$\text{tare} = B + M - \varpi.$$

Après avoir vidé le ballon et l'avoir rempli d'air sec, à la température de 0° et sous la pression actuelle H', il le reportait sous le plateau de la balance. Le fléau s'incline de l'autre côté, et, pour rétablir l'équilibre, on doit ajouter du côté du ballon des poids marqués P. La nouvelle équation d'équilibre était

$$\text{tare} = B + A' + P - \varpi'.$$

En retranchant ces deux équations membre à membre, il vient

$$M - \varpi - P - A' + \varpi' = 0.$$

P est donné directement par l'expérience; A' est le poids d'un volume d'air égal à celui du ballon à 0° et sous la pression H' : il se déduit du poids A (déterminé précédemment) par l'équation $A' = A\frac{H'}{760}$; enfin $\varpi' - \varpi$ est la différence des poussées subies par le ballon dans les deux pesées : elle est négligeable par rapport au poids du ballon plein d'eau. On a donc enfin l'équation

$$M = P + A\frac{H'}{760}.$$

Or $M = Ve_0$, en appelant e_0 le poids spécifique de l'eau pure à 0° : de là on déduit V, et par suite a_0.

Regnault a trouvé ainsi que *le poids d'un litre d'air sec, à 0° et sous la pression normale de 76 centimètres, est égal à* 1,2932 g. Cette détermination a été faite à Paris, c'est-à-dire à la latitude de 48° 50′ 14″, et à l'altitude du Collège de France, qui est de 60 mètres. On peut en déduire le poids du litre d'air (dans les conditions normales de température et de pression) *en un autre lieu du globe,* en se servant des formules de correction relatives à la variation de g (69).

Remarque. — *Connaissant le* poids du litre d'air normal et la *densité d'un gaz, on peut calculer* le poids P d'un volume V de ce

gaz dans les conditions normales de température et de pression. On a $P = Va_0d$, car le produit a_0d représente, *par définition*, le poids normal du litre de ce gaz.

CHAPITRE VI

CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS.

FUSION ET SOLIDIFICATION.

584. **Lois de la fusion.** — *Énoncé.* — Le phénomène de la fusion des corps, que nous avons défini ci-dessus, est soumis à deux lois expérimentales.

1° *Sous une pression constante, tout corps entre en fusion à une température déterminée et invariable pour chaque substance qu'on appelle point de fusion.*

2° *Dès que la fusion d'un corps est commencée, la température cesse de s'élever et reste égale au point de fusion jusqu'à ce que celle-ci soit complète.*

Vérification. — On vérifie les lois de la fusion par les procédés mêmes qui servent à déterminer exactement les points de fusion.

Cas général. — Le cas le plus simple est celui où l'on a à sa disposition une masse notable du corps à expérimenter. On le chauffe directement dans un vase en verre de Bohême (fig. 576) et l'on plonge la boule d'un thermomètre (bien calibré et bien vérifié) dans la substance en fusion. On note le point d'arrêt de la colonne pendant la durée du changement d'état, et on constate : 1° que ce point d'arrêt est toujours le même pour une même substance, chimiquement définie ; c'est le *point de fusion*; 2° que ce point d'arrêt est constant aussi longtemps qu'il reste des parcelles de la substance non fondues.

Si l'on a soin, pendant l'observation du point d'arrêt, de remuer les couches restées liquides, et si l'on fait la correction de température relative à la portion de la tige du thermomètre qui n'est pas immergée, on obtient le point réel de fusion.

Cas particuliers. — Quand on n'a qu'une faible quantité de la substance, on opère autrement. On en introduit quelques milligrammes dans un tube effilé, presque capillaire et à parois minces, et l'on a soin d'établir le contact du corps avec la paroi

interne du tube par une fusion préalable suivie d'un refroidissement. Le tube ainsi préparé est fixé à la tige d'un thermomètre, de manière que la boule de celui-ci se trouve à la hauteur de la masse figée, et l'on plonge le système (fig. 576) dans un vase en verre de Bohême contenant de l'*eau*, de la *paraffine blanche* ou de l'*huile d'amandes douces*, suivant la température qu'on doit atteindre. On chauffe graduellement, en remuant doucement le liquide avec le système, et l'on saisit le point où la masse figée se liquéfie et devient transparente. Cette température (corrigée de l'erreur due à l'émersion d'une partie de la tige) donne le point de fusion.

Fig. 576.

Remarque. — Pour certains corps qui se ramollissent avant de fondre et passent par un état pâteux avant d'arriver à l'état liquide, il n'est pas possible de déterminer avec précision le point de fusion. C'est ce qui a lieu, par exemple, pour les verres de différentes espèces, dont la fusibilité est très variable avec leur composition.

585. **Chaleur de fusion : travail consommé.** — D'après la 2e loi, la température d'un corps en fusion reste constante pendant toute la durée du phénomène, et cela quelle que soit l'intensité de la source de chaleur. Toute la chaleur communiquée pendant la fusion disparaît donc comme chaleur sensible ; d'où l'on conclut qu'elle est consommée par le travail interne nécessaire pour obtenir l'état moléculaire qui constitue la fluidité.

Si l'on mélangeait d'abord 1 kilogramme d'eau, à 0°, avec le même poids d'eau à 79°, on aurait immédiatement 2 kilogrammes d'eau à 39°,5, température moyenne entre celles des deux liquides mélangés. Mais si l'on mélange 1 kilogramme de glace pilée avec un égal poids d'eau à 79°, la glace fond aussitôt et l'on obtient 2 kilogrammes d'eau à 0°. On voit par là que, sans changer de température, et uniquement pour fondre, 1 kilogramme de glace

absorbe la quantité de chaleur qui serait nécessaire pour élever de 0° à 79° 1 kilogramme d'eau. Cette quantité de chaleur représente donc la *chaleur de fusion* de la glace.

Définition. — En général, la quantité de chaleur nécessaire pour fondre l'*unité de poids* d'un solide, *sans élévation de température*, est ce qu'on appelle proprement sa *chaleur de fusion*.

Chaque substance a une chaleur de fusion propre, qu'on peut déterminer par l'expérience.

586. **Fusion aqueuse** ou **Dissolution.** — Un corps *se dissout* lorsqu'il se liquéfie par suite de l'affinité qui s'exerce entre ses molécules et celles d'un liquide. La gomme arabique, le sucre, la plupart des sels se dissolvent dans l'eau. Ce phénomène est évidemment un passage de l'état solide à l'état liquide; c'est un nouveau mode de fusion. On l'appelle soit *fusion aqueuse*, — par opposition à la *fusion sèche* ou *fusion ignée*, — soit, plus ordinairement, *dissolution*.

Chaleur absorbée par la dissolution. — Pendant la dissolution, de même que pendant la fusion, il y a disparition d'une quantité plus ou moins considérable de chaleur. C'est pourquoi la dissolution d'un sel détermine, en général, un abaissement de température.

Cependant, pour certaines dissolutions, la température s'élève au lieu de s'abaisser. Cela tient à ce que, dans ce cas, la dissolution proprement dite est accompagnée de la combinaison du corps dissous avec le liquide, phénomène chimique qui s'opère avec dégagement de chaleur. Par suite, suivant que c'est l'un des deux effets qui prédomine, ou suivant qu'ils sont égaux, il y a production de froid ou de chaleur, ou maintien de la température initiale.

587. **Solidification : définition et lois.** — Nous avons vu que la *solidification* est le passage de l'état liquide à l'état solide. Ce phénomène est soumis à deux lois, qui sont les réciproques de celles de la fusion et qui se vérifient de la même manière.

1° *La solidification se produit, pour chaque corps, à une température fixe, qui est précisément celle de la fusion.*

Cette loi est générale; cependant elle comporte quelques exceptions apparentes, qui sont dues à ce que plusieurs causes peuvent abaisser le point de solidification.

2° *Du moment où la solidification commence, jusqu'à ce qu'elle soit complète, la température reste constante.*

L'expérience fait voir que la chaleur qui redevient sensible pendant la solidification est rigoureusement égale à celle qui disparaît pendant la fusion.

588. **Cristallisation.** — Généralement les corps qui passent *lentement* de l'état liquide à l'état solide affectent des formes géométriques déterminées (tétraèdres ou cubes, prismes, rhomboèdres, etc.) qu'on nomme *cristaux*. Si c'est un corps à l'état de fusion ignée, comme le soufre ou le bismuth, qui se solidifie, on dit que la cristallisation se fait par *voie sèche*; mais si c'est un corps tenu en dissolution dans un liquide, on dit que la cristallisation se fait par *voie humide*. C'est en laissant évaporer lentement les liquides qui tiennent des sels en dissolution que ceux-ci cristallisent. La neige, la glace naissante, les sels nous offrent des exemples de cristallisation. Les flocons de neige présentent des figures d'une symétrie particulièrement remarquable. L'alun offre aussi un très bel exemple de cristallisation (fig. 577).

Fig. 577.

589. **Formation de la glace. — Fleurs de la glace : expérience de Tyndall.** — On sait que l'eau *se congèle* à 0°, et prend alors le nom de *glace*.

La glace a une tendance à cristalliser qui se manifeste dans les formes de fougères arborescentes que l'on voit sur les carreaux de vitre, en hiver, quand la vapeur d'eau vient s'y congeler. Dans un bloc de glace la structure cristalline n'est pas apparente, à cause de l'enchevêtrement et de la soudure des cristaux les uns avec les autres. Mais si l'on fait traverser un bloc de glace par un faisceau de rayons solaires, comme l'a fait Tyndall, la chaleur *décristallise*, en quelque sorte, la masse intérieure et elle désagrège les éléments cristallins qui la constituent : ils deviennent alors visibles par projection. La figure 578 indique le dispositif de l'expérience de Tyndall, et montre en même temps des apparences qui sont projetées successivement sur l'écran. On leur donne le nom de *fleurs de la glace*.

590. **Changements de volume dus aux changements d'état physique. — Force expansive de la glace.** — L'eau, en se refroidissant, ne se contracte que jusqu'à la température de 4°,

et elle se dilate à partir de ce point jusqu'à 0°. Or cet accroissement de volume augmente encore au moment de la congélation, et la glace n'a qu'une densité égale à 0,930 : c'est pourquoi elle flotte à la surface de l'eau.

Fig. 578.

La glace en se formant développe une force expansive considérable, qui fait éclater les vases qui la contiennent. Les pierres dites *gélives* se délitent après la gelée, parce que l'eau qui a pénétré dans leurs pores s'y est dilatée en se congelant.

On cite souvent à ce propos l'*expérience du major Williams*, qui avait exposé au grand air, à plusieurs degrés au-dessous de zéro, deux bombes remplies d'eau, après en avoir fermé solidement la lumière au moyen d'un tampon de bois. Au moment de la congélation, le tampon de l'une d'elles fut lancé avec force à une grande distance, et un bourrelet de glace s'accumula sur les bords de l'orifice (fig. 579). Le tampon de l'autre bombe résista, mais la bombe elle-même fut crevée.

L'eau n'est pas la seule substance qui augmente de volume en se solidifiant. La fonte de fer, le bismuth, l'antimoine, présentent le même phénomène. En général, les autres substances, comme le mercure, le phosphore, le soufre, la stéarine, la cire, se contractent au moment de la solidification.

591. **Exceptions aux lois de la fusion et de la solidification : *Influence* de la pression extérieure.** — La pression *extérieure*, *quand elle* est très intense, peut amener un changement sensible,

en plus ou en moins, dans la température de fusion ou dans celle de solidification.

I. *Effets généraux de la variation de pression.* — Pour les corps qui *se dilatent* en passant de l'état solide à l'état liquide, et qui *se contractent* dans le passage inverse, — ce qui est le cas le plus général, — la pression extérieure est un obstacle à l'augmentation de volume et facilite la contraction : l'accroissement de pression extérieure doit donc amener une élévation de la température de fusion et un abaissement de la température de solidification.

Fig. 579.

Pour les substances, au contraire, qui *se contractent* en passant de l'état solide à l'état liquide, et qui *se dilatent* dans le passage inverse, la pression extérieure doit avoir des effets inverses; elle favorise la solidification et s'oppose à la fusion : elle abaissera donc la température de fusion et élèvera la température de solidification.

Certaines considérations théoriques avaient amené depuis longtemps M. James Thomson (d'Édimbourg) à ces conclusions, et des expériences directes, dues à Bunsen, à M. William Thomson et à M. Amagat, les ont depuis pleinement confirmées.

II. *Vérification expérimentale.* — 1° *Expériences de Bunsen.* — Bunsen a mis en évidence le *retard* de la fusion par l'accroissement de pression (fig. 580).

Il prit un simple tube, doublement recourbé, analogue à une sorte de baromètre à siphon, qu'il ferma à ses deux extrémités, après y avoir introduit la substance *à étudier de e en f*, du mercure de *f* en *b*, et de l'air de b en *a*. On *chauffe dans un bain l'appareil par sa* partie inférieure; le mercure est chauffé

en même temps que la substance; la dilatation du mercure comprime l'air, dont la force élastique réagit sur la substance et la soumet à une pression croissante. Au moment de la fusion, on note d'une part la température du bain, et d'autre part le volume occupé par la masse d'air *ab* d'où l'on déduit la pression.

Bunsen a opéré sur le blanc de baleine ou spermaceti et sur la paraffine. Voici quelques-uns de ses résultats.

Blanc de baleine.	Pressions.	1^{mm}	96^{mm}	156^{mm}
	Températures de fusion.	47°,7	49°,9	50°,9
Paraffine	Pressions.	1^{mm}	85^{mm}	100^{mm}
	Températures de fusion.	46°,3	48°,9	49°,9

2° *Expériences de sir W. Thomson.* — M. W. Thomson a manifesté au contraire l'*accélération de la fusion* par l'accroissement de pression.

Il a opéré sur la glace, qu'il comprimait dans une espèce de *piézomètre*.

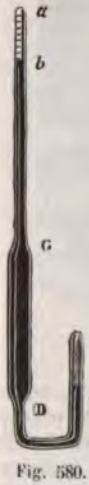


Fig. 580.

Fig. 581.

Il a constaté que le point de fusion s'élève d'une manière continue depuis 0° jusqu'à 0,129° lorsque la pression augmente depuis 1 atm. jusqu'à 16 atm.; par suite la fusion est *avancée* à mesure que la pression *s'accroît*.

3° *Expérience de Mousson.* — La *fusion de la glace* par la compression et la *congélation de l'eau* par la décompression sont rendues manifestes, — sans être mesurées, — par l'expérience suivante, due à Mousson :

L'appareil se compose d'un tube d'acier très épais (fig. 581), qu'on ferme à sa partie inférieure par un bouchon à vis et à sa partie supérieure par une sorte de piston plongeur à vis. On emplit le tube d'eau, on y introduit une bille de métal avant de le refermer, puis on le retourne de manière que la bille tombe et repose sur la base du piston, et on l'introduit, en cet état, dans un mélange réfrigérant : l'eau se congèle et applique solidement la bille contre la pointe de la vis. On manœuvre alors celle-ci, de manière à l'enfoncer dans le cylindre d'acier et à exercer ainsi sur le bloc de glace une pression croissante qui peut s'élever *à plusieurs milliers d'atmosphères*. Cela fait, si l'on débouche l'appareil, on y retrouve un bloc de glace, et entre la glace et le bouchon à vis est logée la bille métallique.

On est obligé d'admettre que la pression a fait fondre la glace, que la bille est alors tombée à travers le liquide, lequel s'est congelé de nouveau en un bloc solide, au moment de la décompression.

592. **Solidification des liquides par la pression. — Expériences de M. Amagat.** — M. Amagat a obtenu la solidification proprement dite de plusieurs liquides par la pression au moyen d'un appareil spécial.

Le liquide renfermé dans un cylindre d'acier reçoit la pression par l'intermédiaire du mercure; le cylindre porte dans le même axe, bien en face l'un de l'autre, deux regards très résistants formés par deux petits cylindres de quartz; un faisceau lumineux traverse ces regards et vient tomber sur une lunette au moyen de laquelle on voit la solidification s'accomplir.

Plusieurs corps en se solidifiant prennent dans ces conditions une forme

cristalline parfaitement nette; les cristaux qui viennent se déposer sur la face interne des regards peuvent être projetés et photographiés. La figure 582 est la reproduction de photographies ainsi obtenues par M. Amagat avec le chlorure de carbone, inconnu jusqu'alors à l'état solide, sous des pressions atteignant 1200 atmosphères.

Avec l'eau M. Amagat a produit le phénomène inverse; on voit le liquide

Fig. 582.

congelé se liquéfier sous la pression et les cristaux se former quand on décomprime lentement (fig. 583).

On peut constater, par les mouvements des cristaux, ce fait non moins instructif que, dans ce dernier cas, les cristaux sont plus légers que l'eau li-

Fig. 583.

quide, tandis que c'est le contraire quand ils sont obtenus par compression : ils sont alors plus lourds que la partie liquide non encore solidifiée.

Ces expériences ne sont pas seulement qualitatives, elles permettent de déterminer la pression sous laquelle se produit le changement d'état à chaque température; ainsi le chlorure de carbone se solidifie

à — 19°,5	sous une pression de	210	atm.
0°	— —	620	—
10°	— —	900	—
19°,5	— —	1160	—

593. Regélation de la glace. — La *regélation* ou *regel* de la

glace est un phénomène qui met en évidence l'influence de la pression sur l'abaissement du point de solidification de l'eau. Voici comment on peut le réaliser : deux morceaux de glace se soudent l'un à l'autre dès qu'on les met en contact, même lorsqu'ils flottent dans de l'eau assez chaude pour qu'on ne puisse y tenir la main.

Expérience de Tyndall. — On peut, grâce à cette propriété, mouler une masse donnée de glace, sous telle forme que l'on veut, en la soumettant à une pression plus ou moins forte. Par exemple, si on la comprime entre deux moules hémisphériques, il y a d'abord rupture en fragments plus petits, qui se soudent aussitôt les uns aux autres; la pression augmentant, il y a de nouveau fracture en parties encore plus petites, puis regélation;

Fig. 584.

et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on arrive, si la pression est suffisante, à former une boule de glace compacte et translucide (fig. 584).

Le même résultat peut s'obtenir en comprimant dans le même moule une quantité suffisante de neige.

Formation des glaciers. — Tyndall a donné de la formation des glaciers dans les Alpes une théorie fondée sur le moulage de la glace par pression. Selon lui, l'apparente *plasticité* qui résulte du regel, jointe à l'entraînement dû à la pesanteur, rend compte de la progression continue des glaciers, depuis les régions élevées où ils se forment par l'agglomération des couches de *névé* jusqu'au bas de la vallée où ils se fondent en torrents boueux.

594. **Exceptions aux lois de la solidification : Surfusion.** — On donne le nom de *surfusion* au phénomène de l'abaissement du

point de solidification des liquides au-dessous de leur température normale de solidification.

C'est dans l'eau qu'on l'a d'abord observé, et nous en avons donné ci-dessus quelques exemples; mais il se rencontre aussi dans beaucoup d'autres liquides.

1° *Expériences de Gay-Lussac. — Il suffit que l'eau soit purgée d'air et complètement immobile pour que son point de congélation soit abaissé de plusieurs degrés.* En effet, Gay-Lussac ayant mis une éprouvette remplie d'eau distillée dans un mélange réfrigérant, et ayant placé le tout sous le récipient de la machine pneumatique, afin que l'air dissous s'en dégageât, l'eau descendit au-dessous de — 12° *sans se solidifier*. Mais si l'on imprimait alors à sa masse un léger ébranlement, une partie du liquide se congelait aussitôt, en même temps que la masse restée liquide remontait à zéro.

2° *Expériences de M. Gernez.* — M. Gernez a fait, sur ce point intéressant, une foule d'expériences des plus ingénieuses. Le soufre, qui fond et se solidifie à 111°, reste *surfondu* jusqu'à la température ordinaire lorsqu'il se refroidit lentement et en repos.

De même, le phosphore, qui se solidifie à 44°, reste liquide jusqu'à 22° dans de l'eau parfaitement tranquille. A cet état, si l'on touche le phosphore surfondu avec un morceau de phosphore solide, la solidification commence aussitôt au point de contact et gagne rapidement toute la masse.

M. Gernez a observé qu'on détermine encore la solidification de toutes les substances qui subissent la surfusion, en frictionnant, dans la masse en fusion, deux corps solides entre eux, ou bien un corps solide contre les parois des tubes dans lesquels sont les corps en fusion.

3° Enfin l'influence d'une vive agitation des molécules liquides peut retarder leur congélation. C'est ainsi que l'eau des rivières et des fleuves ne se congèle que lorsque la température de l'air extérieur s'est abaissée notablement au-dessous de zéro.

Fig. 585.

595. Applications de la fusion aqueuse. — Mélanges réfrigérants. — La disparition de chaleur qui accompagne la dissolution, a été utilisée pour produire des froids artificiels plus ou moins intenses. Cet effet s'obtient en mélangeant des substances qui ont de l'affinité les unes pour les autres et dont l'une au moins est solide, par exemple, de l'eau et un sel, de la glace et un sel, un

acide et un sel : c'est ce qu'on appelle un *mélange réfrigérant*. L'abaissement de température est quelquefois très considérable. Ainsi un mélange formé de 4 parties en poids de chlorure de calcium en poudre avec 3 parties de neige ou de glace pilée peut aller de $+10^{\circ}$ à -51°.

Glacière des familles. — Glacières artificielles. — On fabrique sous le nom de *glacière des familles* un petit appareil qui permet d'obtenir de la glace en toutes saisons. L'appareil consiste en une boîte métallique de forme cylindro-conique (fig. 585), divisée en plusieurs compartiments concentriques. Au centre A, ainsi que dans le compartiment BB, on place l'eau à congeler; dans les compartiments intermédiaires O et C on introduit le mélange réfrigérant; enfin le compartiment extérieur D est bourré d'un corps peu conducteur, tel que du coton, destiné à s'opposer au passage de la chaleur qui vient de l'extérieur. On active la dissolution du mélange et, par suite, la vitesse de refroidissement, en imprimant un mouvement de rotation au liquide à l'aide d'une manivelle.

L'eau une fois congelée, l'eau de fusion de la glace formée s'écoule peu à peu à la partie inférieure et asperge des bouteilles de vin, qui sont ainsi *frappées à la glace*.

CHAPITRE VII

VAPORISATION DANS LE VIDE.

TENSION MAXIMUM DES VAPEURS.

596. **Définitions.** — Nous avons vu que le passage de l'état liquide à l'état gazeux porte le nom de *vaporisation*.

Évaporation et ébullition. — Tantôt les vapeurs ne se forment que lentement à la surface des liquides ; on dit qu'il y a *évaporation*; tantôt il y a *ébullition*, c'est-à-dire production rapide de vapeurs dans la masse même du liquide.

Liquides volatils et liquides fixes. — On appelle liquides *volatils* ceux qui peuvent se vaporiser à toute température, et liquides *fixes* ceux qui ne donnent de vapeurs à aucune température : telles sont les huiles grasses.

Solides volatils. — Il est des corps solides, comme la glace, l'arsenic, le camphre et les matières odorantes, qui donnent immédiatement des vapeurs sans passer par l'état liquide. A une température suffisamment élevée, tous les métaux se vaporisent.

Coloration des vapeurs. — Les vapeurs sont transparentes,

comme les gaz, et généralement incolores ; il n'y a qu'un petit nombre de liquides colorés dont les vapeurs soient elle-mêmes colorées.

Force élastique ou *tension des vapeurs* — Comme les gaz, les vapeurs possèdent une force élastique, par laquelle elles exercent sur les parois des vases qui les contiennent des pressions plus ou moins considérables.

Si l'on fait passer une goutte d'éther dans la courte branche, qui est fermée, d'un tube de verre en siphon (fig. 586), à moitié rempli de mercure, et qu'on plonge le tube dans un bain d'eau à 45° environ, on voit le mercure s'abaisser lentement dans la petite branche : l'espace *ab* se remplit évidemment d'un gaz dont la force élastique fait équilibre à la colonne de mercure *cd* et à la pression atmosphérique qui s'exerce en *d*. Or ce gaz n'est autre chose que de la vapeur d'éther. Si l'on refroidit l'eau du vase, ou si l'on retire le tube du bain, ce qui produit le même effet, la vapeur qui remplissait l'espace *ab* disparaît rapidement, et la goutte d'éther se reforme.

Fig. 586.

597. **Formation des vapeurs dans le vide.** — Lorsqu'un liquide est introduit dans le vide, la formation des vapeurs est *instantanée*.

En effet, si l'on fait passer quelques gouttes d'eau, d'alcool et d'éther respectivement dans des tubes barométriques B, C, D, plongeant dans une même cuvette à mercure (fig. 587), on remarque qu'instantanément les niveaux du mercure baissent plus ou moins dans les divers tubes. Or ce n'est pas le poids du liquide introduit qui déprime le mercure, car ce poids n'est qu'une fraction très petite de celui du mercure déplacé. Il y a donc eu, pour chaque liquide, *une production instantanée de vapeurs* dont la force élastique a refoulé la colonne mercurielle.

Si l'on compare chacun des tubes à vapeur à un tube témoin A où l'on a conservé le vide sec, on constate que la dépression est plus grande dans le tube à alcool que dans le baromètre à eau, et plus grande dans le tube à éther que dans les deux autres. On peut donc résumer ces faits par les deux énoncés généraux suivants :

tions d'éther dans le tube D, on v
d'abord la dépression s'accroît
puis elle demeure constante,
l'éther introduit reste liquide, *si*

excès liquide au contact de l'atmosphère gazeuse. On dit aussi que la vapeur a atteint alors sa *tension maximum*. Si l'on fait varier le volume occupé par la vapeur, la tension maximum reste la même, pourvu que la température soit constante et qu'il y ait toujours un excès liquide. La *tension maximum* augmente avec la température; mais pour une température donnée *elle est indépendante de la pression.*

On démontre aisément ce fait en produisant la vapeur saturante — avec *excès liquide* — dans un tube barométrique gradué, qu'on peut faire plonger plus ou moins dans une cuvette profonde (fig. 588).

Au contraire, les vapeurs non saturées (non en contact avec leur liquide générateur) sont comparables aux gaz et en possèdent toutes les propriétés.

En effet, si l'on n'introduit dans le tube (fig. 588) qu'une très petite quantité d'éther, afin que la vapeur qui se forme n'atteigne pas l'état de saturation, on peut vérifier que la vapeur se comporte comme un gaz ordinaire, et que sa force élastique varie avec le volume qu'on lui fait occuper, conformément à la loi de Mariotte.

Fig. 589.

599. **Détermination des tensions maxima de la vapeur d'eau au-dessous de zéro. — Expériences de Gay-Lussac.** — L'eau, même à l'état de glace et à une température inférieure à 0°, émet de la vapeur. C'est Gay-Lussac qui en a le premier déterminé la tension maximum. Il s'est servi de deux tubes barométriques remplis de mercure et plongeant dans une même cuvette (fig. 589). L'un d'eux, A, qui est droit, est purgé d'air et d'humidité; il sert de baromètre; l'autre, CB, est recourbé de manière qu'une partie de la chambre barométrique plonge dans un mélange réfrigérant. Si l'on fait passer un peu d'eau dans la petite branche B, on voit baisser le niveau du mercure en C. La dépression diminue quand la température du *mélange* baisse, depuis 4,60 mm à 0° jusqu'à *0,33 mm à — 30°.*

Remarque. — Dans cette expérience, la partie B et la partie C du baromètre mouillé ne sont pas toutes les deux à la température du mélange réfrigérant; mais, d'après le *principe de Watt* ou *principe de la paroi froide*, la tension maximum de la vapeur est *la même partout, et correspond à la plus basse des deux températures.*

600. **Principe de Watt** ou **de la paroi froide.** — Lorsque deux vases clos, contenant un même liquide à des températures inégales, sont mis en communication, la tension de vapeur qui s'établit finalement dans ces deux vases *n'est pas*, comme on pourrait le croire, *la tension moyenne entre celles qui existaient*

Fig. 590.

déjà dans chacun d'eux. Par exemple, soient deux ballons, l'un, A, contenant de l'eau à zéro, et l'autre, B (fig. 590), contenant de l'eau maintenue à 100°. Tant que les ballons ne communiquent pas, la tension est égale, dans le premier, à 4,6 mm, et dans le second à 760 mm. Mais aussitôt que la communication est établie, à l'aide du robinet C, la vapeur du ballon B, en vertu de son excès de tension, se précipite en A, mais s'y condense immédiatement, puisque le ballon est maintenu à zéro. Il en résulte que la vapeur ne peut acquérir dans le ballon B une tension supérieure à celle du ballon A; il y a donc simplement distillation de B vers A, sans accroissement de tension.

On peut donc poser ce principe général, énoncé pour la première fois par Watt : *Lorsque deux vases, à des températures inégales, et contenant le même liquide en excès, communiquent entre*

eux, la tension de la vapeur est la même dans ces deux vases, et égale à la tension maximum qui correspond à la plus basse des deux températures.

601. **Détermination des tensions maxima de la vapeur d'eau entre zéro et 100 degrés. — Expériences de Dalton.** — Dalton a mesuré les tensions maxima de la vapeur entre 0° et 100°. Il se servait de deux baromètres A et B (fig. 591), plongeant dans une marmite de fonte pleine de mercure et placée sur un fourneau. L'un, B, est sec; l'autre, A, contient la vapeur d'eau. L'un et l'autre sont maintenus dans un manchon de verre rempli d'eau, où l'on plonge un thermomètre T. On chauffe graduellement la marmite, et par suite l'eau du manchon, et l'on note alors, de degré en degré, sur une échelle E, la dépression qui se produit progressivement dans le tube A. Les différences de niveau observées (réduites à 0°) font connaître les tensions. C'est en opérant ainsi que Dalton le premier a construit une *Table des tensions maxima de la vapeur d'eau* de 0° à 100°.

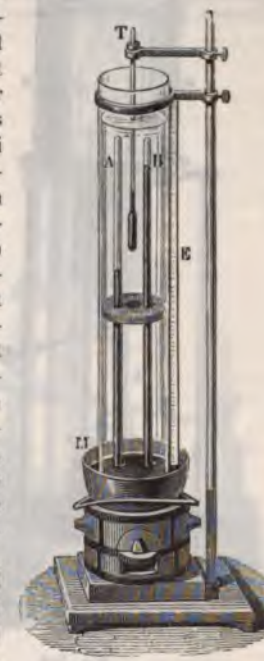


Fig. 591.

602. **Détermination des tensions maxima de la vapeur d'eau entre zéro et 50°. — Expériences de Regnault.** — *Description de l'appareil.* — Regnault a perfectionné l'appareil de Dalton. Il a remplacé le manchon par une caisse de tôle MN (fig. 592) dont le fond porte deux tubulures, dans lesquelles les extrémités supérieures des deux tubes A et B s'engagent, maintenues par des feuilles de caoutchouc. Le baromètre à vapeur B est relié à un petit ballon *a*, à l'aide d'une tubulure de cuivre à trois branches (représentée en O sur la droite du dessin). La branche supérieure de cette tubulure établit la communication avec une machine pneumatique par l'intermédiaire d'un tube D à ponce sulfurique.

Opération. — Avant que les tubes soient fixés dans la caisse, on introduit dans le ballon *a* une petite quantité d'eau, dont on fait

distiller une portion dans le tube B en chauffant légèrement le ballon. On fait alors le vide : l'eau distille d'une manière continue du ballon et du tube barométrique vers le tube D, qui condense les vapeurs. Lorsqu'on a vaporisé plusieurs grammes d'eau, tout l'air contenu dans le tube et dans le ballon a été entraîné et l'on ferme à la lampe le tube capillaire qui relie la tubulure à trois branches au tube B. On remplit d'eau la caisse MN, on chauffe doucement soit sur un fourneau, soit avec une lampe à alcool, en mélangeant constamment, à l'aide d'un agitateur K, les différentes couches du liquide. Une glace de verre, encastrée dans la paroi de la caisse, permet de mesurer au cathétomètre la hauteur du mercure dans les tubes : les différences de niveaux, ramenées à zéro, font connaître les tensions de la vapeur.

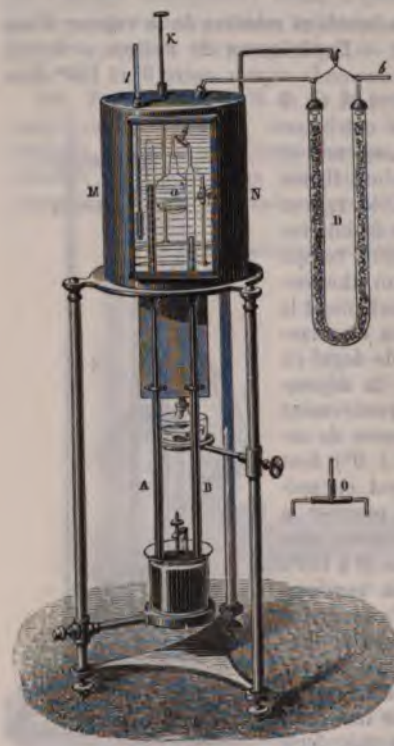


Fig. 592.

C'est ainsi que Regnault a construit une *Table des tensions maxima de la vapeur d'eau* entre zéro et 50°.

603. **Détermination des tensions maxima de la vapeur d'eau au-dessus et au-dessous de 100°. — Expériences de Regnault.** — Deux procédés ont été mis en usage pour mesurer la force élastique de la vapeur d'eau à des températures supérieures à 100°, l'un par Dulong et Arago, en 1830, l'autre par Regnault, en 1844. Nous nous contenterons de décrire ce dernier.

Principe de la méthode. — Elle consiste à faire bouillir de l'eau dans un vase clos, sous une pression connue d'avance, et à mesurer la température de l'ébullition. Elle est fondée sur ce fait d'expérience, que lorsqu'un *liquide entre en*

ébullition, la force élastique de la vapeur qui se dégage est précisément égale à la pression que supporte le liquide (607).

Description de l'appareil. — L'appareil se compose d'un vase de cuivre C (fig. 593), hermétiquement clos et rempli d'eau jusqu'au tiers environ. Quatre thermomètres traversent le couvercle : deux plongent dans les premières couches du liquide, et les deux autres dans les couches inférieures. Du vase C part un tube AB qui va s'adapter au goulot d'un ballon de verre M, de 24 litres de capacité, rempli d'air. Le tube AB est entouré d'un manchon D, dans lequel circule un courant d'eau froide tombant d'un réservoir E. De la partie supérieure du ballon M partent deux tubes : l'un communique avec un manomètre

Fig. 593.

à air libre O; l'autre HH', qui est en plomb, avec une machine pneumatique, ou avec une pompe foulante, suivant qu'on veut raréfier l'air du ballon ou le comprimer. Enfin, le réservoir K est rempli d'eau à la température ambiante.

Opération. — 1° Soit d'abord à mesurer la tension au-dessous de 100°. On met l'extrémité H' du tuyau de plomb en communication avec la machine pneumatique, on raréfie l'air dans le ballon M et, par suite, dans le vase C. Si l'on chauffe alors doucement ce vase, l'eau qu'il renferme entre en ébullition, à une température d'autant moins élevée que l'air a été plus raréfié, c'est-à-dire que la pression est plus faible. D'ailleurs les vapeurs se condensent dans le tube AB, où elles subissent un refroidissement permanent, et la pression indiquée *primitivement par le* manomètre n'augmente pas : par suite, la tension

de la vapeur, pendant la durée de l'expérience, reste égale à la pression qu'exerce sur le liquide l'air du gazomètre. On n'a plus qu'à lire simultanément le manomètre et les thermomètres pour déterminer la tension de la vapeur à une température connue. Laissant ensuite rentrer un peu d'air dans les tubes et dans le vase C, afin d'augmenter la pression, on fait une nouvelle observation, et l'on continue ainsi jusqu'à 100°.

2° Pour mesurer la tension de la vapeur au-dessus de 100°, on fait communiquer le tube H' avec une pompe foulante, au moyen de laquelle on soumet l'air du ballon et du vase C à des pressions croissantes, supérieures à celle de l'atmosphère. L'ébullition se trouve alors retardée (612), et il suffit d'observer simultanément le manomètre et les thermomètres pour avoir les tensions de la vapeur au-dessus de 100°.

Résultats. — Regnault a construit deux tables donnant les tensions maxima de la vapeur d'eau, l'une depuis — 10° jusqu'à 100°, et l'autre de 100° à 230°. Les nombres de la première table ont été déterminés directement par l'expérience; ceux de la seconde ont été calculés à l'aide d'une *formule d'interpolation*

$$\log F = a + b\alpha^t + c\delta^t.$$

F est la tension maximum en millimètres de mercure, t la température (évaluée au thermomètre à air) et a, b, c, α, δ cinq constantes qu'on a calculées à l'aide de cinq valeurs de F mesurées directement à des températures connues, régulièrement espacées entre les températures extrêmes. Les résultats donnés par cette formule empirique sont sensiblement d'accord (à 1/400 près) avec ceux de l'expérience.

Ces tables montrent que la tension de la vapeur d'eau croît suivant une loi beaucoup plus rapide que *la proportionnalité à la température*. Ainsi les tensions sont

4,6	mm	à	0°	2	atm	à	120°,6
91,98	—	à	50°	10	—	à	180°,3
760,0	—	à	100°	28	—	à	230°,9

Remarques. — 1° *Formule de Duperray.* — On a proposé plusieurs autres formes de la formule d'interpolation (Roche, Bertrand, etc.). Celle de Duperray, $F = \theta^4$, où F représente la pression (en Kg par cm²), et θ la température (en *centaines* de degrés), convient pour les applications industrielles.

2° *Expériences de MM. Cailletet et Colardeau.* — Par une méthode spéciale, ces physiciens ont mesuré les tensions maxima de la vapeur d'eau jusqu'à 365°, température où ils ont fixé le point critique de la vapeur d'eau : la tension correspondante est de 200,5 atm.

604. **Tensions maxima des vapeurs de divers liquides.** — La vapeur d'eau, à cause de ses nombreuses applications, a d'abord été seule l'objet des recherches des physiciens. Dalton avait admis, pour les autres liquides, que *leurs tensions maxima sont* égales *pour des températures* également éloignées *de leurs points respectifs d'ébullition.* Regnault, par les mêmes procédés qui lui ont servi à mesurer les forces élastiques de la vapeur d'eau, a aussi déterminé celle des vapeurs d'un certain nombre de liquides. Il a constaté que cette loi *de Dalton est tout à fait inexacte.*

605. **Tensions maxima des dissolutions salines ou acides.** — Lorsque l'eau, ou tout autre liquide, tient en dissolution un sel, un acide, une substance quelconque, l'expérience montre que, à température égale, la tension de la vapeur est *moindre que lorsque le liquide est à l'état de pureté*, et *d'autant moindre* que la dissolution est *plus concentrée*.

Si la substance dissoute est elle-même volatile, la tension des vapeurs mélangées qui se produisent est moindre que la somme de leurs tensions respectives à température égale.

CHAPITRE VIII

CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS

—

ÉBULLITION ET ÉVAPORATION.

ÉBULLITION.

606. **Ébullition : Définition et description du phénomène.** — L'*ébullition* est une production rapide de vapeur, en bulles plus ou moins grosses, dans la masse même d'un liquide.

Lorsqu'on chauffe un liquide, de l'eau par exemple, par la partie inférieure, les premières bulles qui apparaissent ne sont autre chose que de l'air, en dissolution dans l'eau, qui se dégage. Puis de petites bulles de vapeur s'élèvent bientôt de tous les points échauffés des parois; mais, traversant les couches supérieures, dont la température est plus basse, elles s'y condensent avant d'atteindre la surface (fig. 594). C'est de la formation et de la condensation successives de ces premières bulles de vapeur que provient le bruissement qui précède

Fig. 594.

l'ébullition. On exprime ordinairement ce phénomène caractéristique de la première phase de l'ébullition en disant que *l'eau chante*.

Le liquide ne bout pas encore; sa surface libre reste horizontale, calme et unie. Mais bientôt, par suite de l'élévation croissante de la température, de grosses bulles s'élèvent et crèvent à la surface : c'est alors que commence l'*ébullition* proprement dite. Elle est caractérisée par un bouillonnement qui se manifeste dans la masse entière.

607. **Lois de l'ébullition.** — I. *Énoncé.* — Ce phénomène est soumis aux trois lois suivantes :

Fig. 595.

1° *L'ébullition commence à une température déterminée, qui varie d'un liquide à un autre, mais qui est toujours la même pour un même liquide, placé dans les mêmes conditions de pression.*

La température qui correspond à l'ébullition d'un liquide, sous la pression atmosphérique normale, est son *point d'ébullition.*

2° *Dès que l'ébullition a commencé, la température du liquide reste stationnaire.*

3° *Pendant qu'un liquide bout, la force élastique de sa vapeur est égale à la pression extérieure qui s'exerce à sa surface.*

II. *Vérification expérimentale.* — 1re et 2e Loi. — On peut vérifier les deux premières lois au moyen d'un procédé très simple, dû à Dulong. La vapeur, étant produite dans une cornue en verre (fig. 595), vient se condenser, au fur et à mesure de sa production, dans un tube réfrigérant, adapté au tube abducteur de la cornue. Ce tube communique d'ailleurs d'une manière permanente avec un ballon plein d'air, dont la force élastique est évaluée par un manomètre. Un thermomètre, dont le réservoir est placé un peu au-dessus de la surface libre du liquide, donne à chaque instant la température du liquide bouillant. Or on constate que, quelle que soit la pression accusée par le manomètre, pourvu que cette pression soit *constante*, l'ébullition du liquide commence à une température qui est toujours la même (pour une même pression extérieure), et qui reste invariable pendant toute la durée de l'ébullition.

Fig. 596.

Remarque. — Cette expérience de vérification est en même temps un procédé de détermination des points d'ébullition des divers liquides.

3e Loi. — On peut vérifier simplement la troisième loi à l'aide d'un tube recourbé A, en forme de baromètre à siphon, dont la petite branche serait fermée (fig. 596). Cette petite branche étant pleine de mercure, on y fait passer une certaine quantité d'eau, puis on engage l'appareil tout entier dans un ballon à moitié plein d'eau. Lorsqu'on porte l'eau du ballon à l'ébullition, celle de la petite branche du siphon finit elle-même par bouillir, et l'on

voit alors les niveaux du mercure se mettre sur le même plan horizontal dans les deux branches. Cela prouve qu'ils supportent l'un et l'autre la même pression; or c'est la pression atmosphérique qui s'exerce librement dans la grande branche : donc *la force élastique de la vapeur de l'eau bouillante est égale à la pression atmosphérique.*

608. **Détermination des points d'ébullition.** — Par des méthodes analogues à celle que nous avons indiquée ci-dessus, on a déterminé les points d'ébullition de toutes les substances chimiquement définies. Ce coefficient est un des caractères physiques les plus importants de la pureté des corps.

L'expérience prouve que plusieurs circonstances peuvent faire varier la température d'ébullition d'un liquide; ce sont : l'existence de certaines substances en dissolution, la nature des parois des récipients, l'absence d'air ou d'autre gaz en dissolution dans le liquide, et principalement la pression extérieure.

609. **Influence des substances en dissolution.** — Toute substance dissoute dans un liquide, lorsqu'elle n'est point volatile ou qu'elle l'est moins que le liquide, retarde l'ébullition, et d'autant plus que la dissolution est plus concentrée.

Ainsi l'eau, qui bout à 100° lorsqu'elle est pure, ne bout qu'à des températures plus élevées lorsqu'elle est saturée de différents sels. L'eau saturée de sel marin bout à 109°; saturée de chlorure de calcium, elle ne bout plus qu'à 179° C.

Les dissolutions acides présentent la même anomalie.

Il importe de rappeler ici les expériences de Rudberg, déjà citées. Elles ont démontré que, bien que la température d'ébullition *de l'eau* soit supérieure à 100° par l'effet des substances qu'elle tient en dissolution, la température *de la vapeur* qui s'en dégage est cependant toujours égale à 100°, comme si l'eau était pure, *pourvu que la pression demeure égale à 760 mm.*

610. **Influence de la nature des parois des récipients.** — Gay-Lussac a observé que, en prenant pour point 100° la température d'ébullition de l'eau distillée, dans un vase de cuivre (sous la pression 760 mm), ce même liquide, dans un ballon de verre, n'entre en ébullition qu'à 101°; à pression égale et quand le vase de verre a été bien nettoyé, le point d'ébullition de l'eau peut s'élever jusqu'à 105° et même 106°.

Toutefois un simple fragment de métal, placé au fond du ballon, suffit alors pour ramener la température d'ébullition à 100°. Par le même procédé on peut faire disparaître les soubresauts violents qui accompagnent l'ébullition des dissolutions salines ou acides dans les vases de verre.

Comme dans le cas des substances en dissolution, la température de la vapeur n'est pas influencée par celle que prend l'eau dans les vases de verre.

611. **Influence de l'absence d'air ou de gaz dissous.** — L'absence d'air dans l'eau retarde aussi sa température d'ébullition.

Deluc remarqua le premier que de l'eau privée d'air par une ébullition *préalable* pouvait être chauffée sans bouillir jusqu'à 112° dans un matras à *long col.*

Expériences de Donny. — M. Donny (de Gand) a étudié ce phénomène en se servant d'un tube de verre AB (fig. 597) recourbé à un bout, et terminé à

l'autre par une grosse boule de même matière, suivie d'une autre, plus petite, qui se termine en pointe effilée. Avant de fermer celle-ci, on introduit de l'eau dans le tube, par le même procédé que l'alcool dans un thermomètre, puis on la fait bouillir un certain temps pour chasser tout l'air. Soudant alors la pointe effilée à la lampe, on a de l'eau dans la branche recourbée, et de la vapeur à une très faible tension dans le tube AB et dans les boules. Or, si l'on plonge maintenant la partie AC, remplie d'eau, dans une solution concentrée

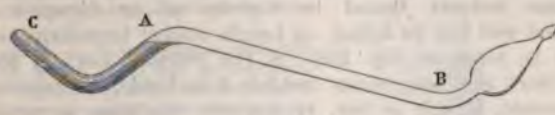


Fig. 597.

de chlorure de calcium, et si l'on chauffe graduellement, la température peut monter à 130° sans qu'il se manifeste aucune ébullition dans le tube. Ce n'est qu'à 138° que l'ébullition a lieu; mais alors elle se produit tout d'un coup et l'eau est projetée dans les boules, qui sont quelquefois brisées.

Expériences de Dufour. — M. Dufour (de Lausanne) préservait les liquides en expérience du contact de l'air, en les mettant en suspension dans des liquides de même densité, mais moins volatils.

Il a ainsi trouvé que l'eau, en suspension dans un mélange convenable d'essence de girofle et d'huile de lin qu'on chauffait au bain-marie, ne se transforme brusquement en vapeur qu'à une température voisine de 120°. L'acide sulfureux liquide, qui bout normalement à — 10°, reste liquide jusqu'à + 18° lorsqu'il est mis en suspension dans un mélange d'eau et d'acide sulfurique.

Fig. 598.

612. Influence de la pression sur la température d'ébullition. — 1° *Influence de la diminution de pression. — Ébullition de l'eau à basse température.* — Pour démontrer que la température d'ébullition s'abaisse avec la pression, on place sous le récipient de la machine pneumatique une capsule contenant de l'eau à 30° environ, puis on fait le vide. On voit alors le liquide entrer en ébullition avec

entraîne tout l'air du ballon, on bou
et on le retourne (fig. 598). Si
supérieure avec une éponge imbibé
condensent, le vide se fait, et une
C'est ce qu'on appelle l'*expérience d*

Ébullition dans le vide. — Dans le
en ébullition à 0°, puisque la tensio
4,6 mm.

Ébullition à l'air libre sur les mon
diminution de pression que sur les h
au-dessous de 100°. Sur le Mont-Blan

2° *Influence de l'accroissement de p*
se produit lorsqu'on augmente la pr
qu'à 120°,6 quand on exerce à sa su
2 atmosphères.

Production de la vapeur en vase clo
particulièrement sentir lorsqu'on ch
liquides non plus à l'air libre, mais en
l'ébullition est alors profondément n
produisent ne trouvant aucune issue,
croissent de plus en plus avec la ten
ment continu qui constitue l'ébullitio
quent, tandis que, dans un vase o
liquide ne peut dépasser son point d'é
au contraire, elle peut s'élever de be

sur le sommet d'une montagne, tandis qu'à sa base elle bout à 98°, et qu'on cherche dans les tables des forces élastiques les tensions correspondantes, on trouve des nombres qui représentent, en millimètres de mercure, les forces élastiques que possédait la vapeur au moment où elle se dégageait au sommet et au pied de la montagne, et par suite les pressions atmosphériques supportées par l'eau en ébullition aux deux stations. Connaissant ainsi la hauteur barométrique au sommet de la montagne et à sa base, on n'a plus qu'à appliquer les formules déjà données pour mesurer la hauteur des montagnes à l'aide du baromètre.

Instruments. — Pour appliquer cette méthode, on ne fait usage que de thermomètres très sensibles, gradués seulement de 80° à 100° environ, de manière que, chaque degré occupant une grande étendue sur l'échelle, on puisse apprécier les dixièmes et même les vingtièmes de degré. C'est sur ce principe qu'est construit le *thermomètre hypsométrique* ou *hypsomètre* de Regnault, qui consiste en un pareil thermomètre pouvant s'adapter à une étuve à vapeur (fig. 599). Pour cet usage, Regnault a construit des tables qui donnent la tension de la vapeur d'eau, de 85° à 101°, par dixièmes de degré.

Fig. 599.

614. **Application : Marmite de Papin ou digesteur.** — Denis Papin étudia le premier la production de la vapeur d'eau dans un vase hermétiquement clos.

Description de l'appareil. — L'appareil dont il se servit est une sorte de marmite ou de vase cylindrique de bronze M (fig. 600). On la ferme par un couvercle de même métal, qu'une vis de pression maintient solidement appliqué contre les bords. La fermeture est rendue plus hermétique par l'interposition de feuilles de plomb entre ces bords et ceux de la marmite. Sur le couvercle est adaptée une tubulure de bronze, dans laquelle s'engage librement un boulon d'acier *u*. Au-dessous de celui-ci, le couvercle est percé d'un petit trou fermé par une soupape conique sur laquelle s'appuie le boulon. Ce dernier est pressé contre la soupape par un levier *ab*, mobile à son extrémité *a*. Enfin un poids *p*, qui se place le long du levier, permet d'exercer sur le boulon *u* une pression variable. On règle la charge de la soupape de manière que celle-ci

Fig. 600.

grâce à la surélévation de temp
donne aussi le nom de *digesteur*.

615. **Chaleur de vaporisation.**
sorbée par l'*unité de poids* d'un
vapeur, sans changer de tempéra
risation.

Cette chaleur disparue est tran

risation. Cette absorption peut ainsi devenir une cause de froid très intense.

616. Liquéfaction ou condensation des vapeurs. — Restitution de la chaleur de vaporisation. — La *liquéfaction* ou *condensation des vapeurs* est le passage inverse de l'état gazeux à l'état liquide. Trois causes peuvent opérer la condensation : le refroidissement, la compression et l'affinité chimique. Les deux premières causes n'agissent que sur les vapeurs à l'état de saturation ; mais la dernière produit la liquéfaction des vapeurs même les plus raréfiées. C'est ainsi qu'un grand nombre de sels absorbent, en la condensant, la vapeur d'eau de l'atmosphère, en quelque faible proportion qu'elle s'y trouve.

Fig. 601.

Lorsque les vapeurs se condensent, la force vive qui avait été communiquée aux molécules pendant la vaporisation est transformée inversement en une quantité équivalente de chaleur sensible. On vérifie, en effet, par l'expérience, qu'un poids donné de vapeur dégage en se liquéfiant une quantité de chaleur rigoureusement égale à celle que le même poids d'eau avait absorbée en se vaporisant. Pour cela, on fait arriver un courant de vapeur à 100° dans un certain poids d'eau froide qui s'échauffe rapidement jusqu'à 100°, et l'on constate que la chaleur cédée à l'eau est *exactement égale à la* chaleur consommée pendant la vaporisation.

617. **Application de l'ébullition. — Essai des vins par distillation : Alambic de Salleron.** — M. Salleron a construit, pour déterminer la richesse alcoolique des vins et autres spiritueux, un *appareil à distillation* qui est une application de l'ébullition.

Il se compose d'une sorte de petit *alambic*, réduit à un ballon de verre posé sur un trépied, et qu'on peut chauffer à l'aide d'une lampe à alcool (fig. 601), et d'un petit serpentin en cuivre, placé dans un vase de cuivre plein d'eau froide : au-dessous est une éprouvette qui reçoit le produit de la distillation. Sur l'éprouvette sont tracées trois divisions : l'une, *a*, est destinée à marquer le volume de vin qu'on doit distiller; les deux autres, marquées $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{5}$, servant à évaluer le volume du liquide résultant de la distillation.

Opération. — On commence par remplir l'éprouvette jusqu'en *a* du vin à essayer; puis, ayant versé le contenu dans le ballon, on opère la distillation. On la prolonge, pour les vins ordinaires, jusqu'à ce que le liquide distillé s'élève dans l'éprouvette à la division $\frac{1}{5}$, et à la division $\frac{1}{2}$ pour les vins très alcooliques : on peut admettre alors que tout l'alcool du vin est passé dans l'éprouvette. Enfin, on achève de remplir l'éprouvette d'eau distillée jusqu'en *a*, ce qui donne un *liquide de même volume que celui du vin sur lequel on a expérimenté et également riche en alcool, mais débarrassé de toute substance étrangère.* Il ne reste plus qu'à évaluer le degré de ce liquide avec l'alcoomètre de Gay-Lussac. L'appareil de Salleron est accompagné d'un alcoomètre centésimal, d'un thermomètre et d'une table de corrections.

ÉVAPORATION.

618. **Définition du phénomène.** — On a déjà vu qu'on entend par *évaporation* une production lente de vapeur à la surface d'un liquide. C'est par évaporation que les étoffes mouillées sèchent à l'air, ou que l'eau contenue dans un vase ouvert disparaît complètement au bout d'un certain temps. C'est à l'évaporation qui se produit à la surface des mers, des lacs, des rivières et du sol, que sont dues les vapeurs qui s'élèvent dans l'atmosphère, s'y condensent en nuages et se résolvent en pluie.

Tout liquide s'évapore dès que sa tension de vapeur n'est pas nulle; mais son évaporation cesse, quelle que soit la température, dès que l'air ambiant est saturé.

619. **Cas particuliers d'évaporation.** — 1° *Évaporation de l'acide sulfurique.* — Ce liquide ne donne plus de vapeurs au-dessous de 30°, même dans le vide. En effet, si l'on place sous le récipient de la machine pneumatique deux capsules contenant l'une de l'acide sulfurique, l'autre de l'eau de baryte, et qu'on fasse le vide, il ne se forme pas de précipité blanc de sulfate de baryte tant que la température est inférieure à 30°.

2° *Évaporation du mercure.* — Faraday l'avait étudiée par une expérience très nette. En appliquant une feuille d'or sur l'extrémité inférieure d'un bouchon, et fermant avec celui-ci un flacon contenant du mercure, il vit au bout de quelques jours l'or blanchir en s'amalgamant; il constata, en outre, que le phénomène ne se produisait qu'autant que la température était supérieure à — 6°. De là il avait conclu que — 6° était la température limite de l'évaporation du mercure. Or, dès 1838, Regnault avait observé que le mercure se

vaporise à — 15°; et, après lui, M. Merget (de Lyon) a constaté que ce liquide donne encore des vapeurs à — 44°. De plus, il a reconnu que les vapeurs mercurielles possèdent un pouvoir de diffusion tel, que dans les locaux vastes et élevés on en constate la présence, à la température ordinaire, depuis le sol jusqu'au plafond, même quand elles sont émises par des surfaces d'évaporation peu étendues.

620. **Circonstances qui accélèrent l'évaporation.** — Quatre circonstances principales influent sur l'évaporation, pour l'accélérer. Ce sont : 1° l'*élévation* de la température; 2° la *diminution* de la quantité de vapeur du même liquide répandue dans l'atmosphère ambiante; 3° le renouvellement de cette atmosphère; 4° l'étendue de la surface d'évaporation.

L'élévation de température accélère l'evaporation par l'accroissement de tension qu'elle communique aux vapeurs.

Pour comprendre l'influence de la seconde cause, remarquons que l'évaporation d'un liquide serait nulle dans un espace saturé de la vapeur du même liquide, et qu'elle atteindrait son maximum dans un air complètement purgé de cette vapeur. Il résulte de là qu'entre ces deux cas extrêmes la rapidité de l'évaporation varie, selon que l'atmosphère ambiante se trouve déjà plus ou moins chargée des mêmes vapeurs.

Quant au renouvellement de l'atmosphère, son influence s'explique de la même manière; car, si l'air ou le gaz ambiant n'est pas renouvelé, il est promptement saturé, et toute évaporation cesse. L'influence de la quatrième cause est évidente.

621. **Froid dû à l'évaporation.** — Lorsqu'un liquide qui s'évapore ne reçoit pas une quantité de chaleur équivalente à celle qui devient *latente*, sa température s'abaisse nécessairement, et son refroidissement est d'autant plus grand que l'évaporation est plus rapide.

Fig. 602.

Expérience de Leslie. — Ainsi Leslie est parvenu à congeler l'eau par le seul effet d'une évaporation rapide. On place sous le récipient de la machine pneumatique un vase de verre contenant de l'acide sulfurique concentré, et au-dessus une petite capsule A de liège ou de gutta-percha (fig. 602), contenant quelques grammes d'eau. Si l'*on fait le vide, l'eau entre en* ébullition et, comme les

Fig. 605.

on fait
on plon
gérant.
la boule
le froid,
ébullitio
peurs. I
rapide,
et finit p
glace.

Congél
opère av
l'eau, pa
fureux, q
froid assez intense pour congeler
rience en enveloppant de coton
mercure; puis, après l'avoir arros
sous la cloche de la machine pn
bientôt le mercure est solidifié.

Congélation de l'alcool. — On
régulièrement des abaissements d
considérables en faisant évapore
liquides provenant de gaz liquéfié
ment obtenus. C'est ainsi que M. I
à faire bouillir l'acide carbonique

par M. Pictet, puis par MM. Olszewski et Wroblewsky, aux gaz anciennement appelés *permanents*.

2° *Alcarazas.* — Le froid produit par l'évaporation est utilisé dans les pays chauds pour rafraîchir l'eau au moyen d'*alcarazas*. On nomme ainsi des vases de terre assez poreux pour que l'eau, filtrant lentement à travers leurs parois, vienne s'évaporer à leur surface, surtout si on les place dans un courant d'air.

Congélateur de E. Carré. — La congélation de l'eau par l'évaporation dans le vide sec (à l'acide sulfurique) a reçu une application industrielle dans le congélateur de M. E. Carré, que nous avons déjà décrit à propos des machines pneumatiques.

ÉTAT SPHÉROÏDAL OU CALÉFACTION.

623. Définition et historique. — Les liquides versés sur des surfaces métalliques incandescentes présentent des phénomènes remarquables, qui paraissent être en contradiction avec les lois de l'ébullition ci-dessus exposées, parce qu'une évaporation superficielle tout autour de la masse liquide remplace et empêche l'évaporation intérieure. Le fait fut observé pour la première fois, il y a plus d'un siècle, par Leidenfrost et étudié ensuite par quelques physiciens, par Boutigny d'abord, puis récemment par M. Émile Gossart.

Si l'on chauffe jusqu'au rouge une capsule d'argent ou de platine à parois épaisses et qu'on y verse quelques grammes d'eau au moyen d'une pipette, on remarque que le liquide ne s'étale pas dans la capsule et ne la mouille pas, comme il ferait à la température ordinaire, mais qu'il prend la forme d'un globule aplati. C'est ce que Boutigny exprime en disant qu'il passe à l'*état sphéroïdal*. A cet état l'eau est en apparence très calme ou animée d'un mouvement giratoire très rapide sur le fond de la capsule, suivant sa température; et non seulement elle n'entre pas en ébullition, mais elle se vaporise *cinquante fois plus lentement* que s'il y avait ébullition.

Enfin, si la capsule se refroidit, il arrive un moment où elle n'est plus assez chaude pour maintenir l'état sphéroïdal. Ses parois sont alors mouillées par le liquide et, suivant leur température, il y a ébullition violente ou étalement paisible de la goutte.

Tous les liquides peuvent prendre cet état; ils l'atteignent et le conservent d'autant plus facilement qu'ils sont plus volatils et que le support est plus poli.

624. Absence de contact. — Une particularité qui entraîne toutes les autres, c'est l'absence de contact entre le liquide et son support.

Boutigny s'en est assuré en faisant rougir une plaque d'argent disposée bien horizontalement et versant dessus un gramme d'eau colorée en noir; ce liquide passe à l'état sphéroïdal. Or si l'on place la flamme d'une bougie à une certaine distance sur le prolongement de la plaque (fig. 604), on distingue nettement et d'une manière continue cette flamme entre le sphéroïde et la plaque. On conclut de là que le liquide se maintient à une petite distance de celle-ci, ou qu'il fait des vibrations assez rapides pour que l'œil ne puisse les distinguer.

M. Gossart a pu du reste prendre la photographie instantanée de cette goutte et de l'intervalle en question, en la maintenant en repos par un petit trépied en fil de platine dans un faisceau de lumière solaire bien horizontal.

Une expérience classique de Poggendorff met en évidence ce même intervalle rempli de vapeur mauvaise conductrice de l'électricité. Elle consiste à réunir la goutte acidulée et la plaque par un fil métallique dans lequel on intercale également une pile et un galvanomètre : la déviation du galvanomètre, indiquant la fermeture du circuit conducteur, ne se produit qu'au moment *où cesse la caléfaction*.

M. Gossart remplace la pile et le galvanomètre par une bobine de Ruhmkorff dont les étincelles sont renforcées par une bouteille de Leyde ; la plaque et la goutte sont mises dans le circuit principal (fig. 1030, p. 1305) et la bouteille de Leyde en dérivation. La couche de vapeur mauvaise conductrice se manifeste

Fig. 604.

alors à distance, vivement illuminée, et avec des couleurs différentes, suivant les sels dissous dans la goutte. On peut en observer l'image allongée dans un miroir tournant, et reconnaître à quelques points noirs de la bande lumineuse qu'il y a pourtant contacts partiels très courts du liquide et du support. — On peut les attribuer à des mouvements vibratoires très rapides et de trop faible amplitude pour modifier le contour apparent de la goutte, sauf quand la température élevée de la plaque donne la forme étoilée bien connue (fig. 605).

Fig. 605.

625. **Forme des gouttes.** — Le sphéroïde présente nécessairement *à sa partie supérieure* la forme générale de toute goutte liquide sur un support, par exemple d'une goutte de mercure sur un plan de verre ; cette forme générale résulte en effet de ce que, dans chaque plan horizontal mené à travers la goutte, à distance verticale z du sommet, il y a équilibre entre la pression hydrostatique zD et la pression capillaire

$$S\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{r'}\right).$$

Mais, tandis que les gouttes de mercure (ou de tout autre liquide) sur une *plaque* ont des épaisseurs et des angles de raccordement nullement *constants*, par suite de la variabilité de leur adhésion au solide, ou, ce qui revient *au même*, par suite de la tension superficielle S_4, très variable également à la *base de la* goutte, ici il n'en est plus de même.

Le sphéroïde, étant soustrait à toute action moléculaire du support, est enveloppé complètement par une atmosphère gazeuse, non homogène, mais qui lui laisse cependant une tension superficielle constante et par suite une pression capillaire et une courbure continûment variables. Il en résulte pour toutes les gouttes caléfiées un angle de raccordement exactement de 180°, une forme générale constante, indépendante, aussi bien en bas du sphéroïde qu'en haut, de

Fig. 606.

la nature du support et du liquide, et enfin pour chaque liquide une épaisseur plus grande que sur tout support adhérent. Cet angle de raccordement nul et cette forme générale (fig. 606) sont une caractéristique de l'état dit sphéroïdal qui n'est qu'une forme capillaire spéciale, et d'autre part l'épaisseur des gouttes est une constante caractéristique du liquide caléfié, dépendant seulement de sa densité et de sa tension superficielle à la température de caléfaction [1].

626. Température du liquide. — Boutigny a observé que la température des liquides à l'état sphéroïdal est *constamment inférieure* à leur point d'ébullition. L'eau, par exemple, reste à 97°, l'alcool à 75°,5, l'éther à 34°, l'acide sulfureux à —10°; mais la température de la vapeur qui ne se produit pas dans la masse du liquide peut être plus élevée.

Cette propriété des liquides à l'état sphéroïdal a conduit Boutigny à une expérience remarquable, celle de la congélation de l'eau dans une capsule incandescente. On chauffe au rouge une capsule de platine et l'on y verse quelques grammes d'acide sulfureux anhydre. Ce liquide, qui ne bout qu'à —10°, se comporte dans la capsule comme on l'a vu ci-dessus, c'est-à-dire que sa température s'abaisse au-dessous de —10°. Si alors on ajoute à l'acide sulfureux une petite quantité d'eau, celle-ci, refroidie par l'acide, se congèle instantanément, et, la capsule étant *encore rouge*, on en retire un morceau de glace.

Fig. 607.

M. Gossart a vérifié que cette même propriété subsiste sous toute pression, par exemple dans le vide, c'est-à-dire que la température de caléfaction est, à

1. *Voir les Comptes Rendus*, 26 septembre 1887, note de M. E. Gossart.

toute pression, très peu inférieure à la température d'ébullition régnnere sous la même pression, la différence entre ces deux températures croissant continûment avec la pression.

Il se sert pour cela d'une platine en cuivre rouge en forme de tronc de cône P (fig. 607), dont la base supérieure est une capsule légèrement concave; la face latérale se recourbe en un conduit circulaire horizontal, RR, traversé par un courant d'eau froide, au-dessus duquel on mastique une cloche de verre dans une rigole; trois tubes t, t', t'', traversant cette platine, permettent l'enlèvement de l'air par une machine Carré, la mesure de la pression par un manomètre et l'alimentation continuelle du globule caléfié. Un thermomètre à réservoir plat T, glissant à frottement dans le bouchon de la cloche, permet de mesurer la température du globule.

En poussant la raréfaction jusqu'à 4 millimètres de mercure, on voit la goutte d'eau, d'au moins 4 à 5 grammes, devenir opaque sur le creuset incandescent, puis se prendre en totalité en un glaçon arrondi que l'on peut soulever avec le thermomètre, ou abandonner sur la plaque à son mouvement vibratoire très bruyant [1].

627. **Température des plaques.** — La caléfaction est d'autant plus facile à réaliser que le support est plus chaud. En observant avec une lunette le sphéroïde devant une flamme, on voit décroître l'intervalle lumineux à mesure que la plaque se refroidit. Boutigny a constaté que l'état sphéroïdal sur une plaque de platine peut ne cesser pour l'eau qu'à 140° et pour l'alcool à 134°.

Mais sur des plaques d'argent ou d'or, susceptibles d'un poli plus parfait, on peut maintenir cet état pour l'eau jusqu'à 80°. Il n'y a plus alors entre le liquide et son support cette différence de température qu'on *croyait caractéristique de la caléfaction*, et le sphéroïde, au lieu d'entrer en ébullition au moment du contact, s'étale paisiblement sur la plaque, en passant d'une forme capillaire à une autre, d'un angle de raccordement de 180° à un angle de raccordement tout petit.

628. **Explication de l'état sphéroïdal.** — Pour expliquer tous ces faits, on peut admettre que le globule liquide est soutenu à distance du support par la tension de la vapeur qui se produit continuellement à sa surface.

Ce matelas de vapeur doit donc isoler la goutte liquide complètement dans l'espace, la soustraire à toute action moléculaire du support et lui donner ainsi sa forme type.

D'autre part, le liquide n'est pas chauffé par contact, mais seulement par rayonnement; comme il est *diathermane*, c'est-à-dire transparent pour les rayons émis d'une source incandescente, une grande partie de la chaleur rayonnante le traverse sans l'échauffer, en sorte qu'il s'évapore très lentement. Cette évaporation toute superficielle, qui absorbe cette faible chaleur, maintient le liquide en équilibre, à une température un peu inférieure à celle que produirait une évaporation intérieure, c'est-à-dire l'ébullition.

C'est par suite de cette évaporation continue qu'il se produit entre le support et le liquide une répulsion d'autant plus intense que la température de la plaque est plus élevée.

Mais cette température élevée n'est pas nécessaire, et l'on conçoit qu'étant donnée la faible distance à laquelle s'exercent les actions moléculaires, une couche de vapeur excessivement mince puisse suffire à protéger les sphéroïdes contre l'attraction de la plaque et sa chaleur de conductibilité, si celle-ci ne présente pas d'aspérités. De là leur conservation sur une plaque bien polie à une température relativement basse; de là aussi la possibilité de faire rouler à température ordinaire des gouttes d'un liquide sur un liquide de même nature et l'impossibilité de les faire rouler sur un liquide de nature différente, parce

1. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 9 mai 1887.

que dans le premier cas il y a conservation, et dans le second cas destruction immédiate du matelas de vapeur protecteur des gouttes.

Ces gouttes roulantes étant absolument identiques à celles des plaques incandescentes, et par leur forme et par la cause de leur production, on voit que le grand échauffement du support n'est point une condition nécessaire de l'état dit sphéroïdal; l'émission de vapeur par le liquide n'est pas une condition indispensable non plus et on peut réaliser l'état sphéroïdal dans une atmosphère liquide. Si l'on dépose une large goutte de mercure sur une plaque d'or bien polie, plongée dans de l'alcool qui la mouille bien, cette goutte restera isolée de l'or par une mince couche d'alcool, car l'or n'est pas attaqué et l'on peut répéter avec cette goutte et cette plaque l'expérience de Poggendorff.

On a bien ainsi, par voie humide, l'état sphéroïdal, avec l'angle de raccordement nul, la grande épaisseur et la forme des sphéroïdes de Boutigny. Cela s'explique par la constance de la tension superficielle dans toute la surface mercure-alcool qui enveloppe la goutte et qui prend une courbure continûment croissante de haut en bas.

Ce qui caractérise l'état dit sphéroïdal semble donc bien être *une forme capillaire spéciale*, se produisant toutes les fois qu'une petite masse liquide est entourée complètement par un fluide (vapeur ou liquide) où elle prend *une tension superficielle constante*[1].

CHAPITRE IX

LIQUÉFACTION ET SOLIDIFICATION DES GAZ ET DES VAPEURS.

629. **Historique. — Différents procédés.** — Les gaz, n'étant que des vapeurs très éloignées de leur point de saturation, sont, comme celles-ci, susceptibles d'être liquéfiés.

Tube de Faraday. — Davy et Faraday les premiers liquéfièrent un grand nombre de gaz regardés jusqu'alors comme permanents. Leur procédé consistait à enfermer dans un tube de verre recourbé en siphon, appelé *tube de Faraday* (fig. 608), des substances qui, par leur réac-

Fig. 608.

1. *Ém. Gossart, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 26 octobre 1891.

tion chimique, donnent naissance au gaz qu'il s'agissait de comprimer; de sorte que, ces substances étant contenues dans l'une des branches du siphon, le gaz, à mesure qu'il s'en dégage, vient se comprimer lui-même et se liquéfier dans l'autre branche, qui est plongée dans un mélange réfrigérant. Les deux physiciens liquéfièrent ainsi le chlore, l'acide sulfhydrique, l'ammoniaque et l'acide carbonique.

Liquéfaction de l'acide carbonique. — Appareil de Thilorier. — L'acide carbonique peut être amené à l'état liquide simplement par une compression considérable. Cette liquéfaction ne doit donc s'opérer que dans des appareils spéciaux, présentant la plus grande solidité. Le premier appareil de ce genre fut imaginé par Thilorier. On peut considérer cet appareil comme un perfectionnement direct du tube de Faraday [1].

L'acide carbonique liquéfié est un liquide très mobile, incolore et très volatil. La tension maximum des vapeurs qu'il émet à la température de 15° s'élève à 50 atmosphères.

Le froid produit par cette évaporation doit donc être considérable. Et, en effet, le refroidissement qui en résulte suffit pour amener la solidification d'une portion du liquide, lorsqu'on le fait évaporer dans une boîte spéciale, imaginée par Faraday, et notablement perfectionnée par M. Cailletet. L'acide solide se présente alors sous l'aspect de flocons blancs filamenteux qui ne se vaporisent à l'air que très lentement. On peut constater alors, à l'aide d'un thermomètre à alcool, que sa température est d'environ — 78°.

Expériences récentes. — Depuis Thilorier, plusieurs physiciens, entre autres Colladon, Natterer, Berthelot, Andrews, Melsens, se sont occupés de la liquéfaction et de la solidification des gaz; mais six de ces corps (l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le bioxyde d'azote, l'oxyde de carbone et l'hydrogène protocarboné) avaient résisté à toutes les tentatives, lorsque, à la fin de 1877, M. Cailletet, à Châtillon-sur-Seine, et M. Raoul Pictet, à Genève, sont parvenus simultanément, à l'aide d'appareils différents, à liquéfier les six gaz qu'on désignait sous le nom de *gaz permanents*. MM. Wroblewski et Olszewski ont obtenu ensuite, en 1883, des résultats encore meilleurs.

Remarque. — Un des résultats pratiques les plus intéressants, c'est qu'on livre maintenant dans le commerce, à très bas prix, des gaz liquéfiés, tels que le chlorure de méthyle, l'acide sulfu-

1. *Nous ne le décrivons pas, malgré son ancienne célébrité, parce que, depuis les travaux récents, il n'a réellement plus qu'un intérêt historique.*

reux, l'acide carbonique. Ces liquides sont renfermés dans des cylindres de fonte ou d'acier, fermés par des robinets à vis. L'acide carbonique liquide est actuellement fabriqué en Allemagne, près de Berlin. Il est livré dans de grands cylindres d'acier, qui en contiennent jusqu'à 8 kilogrammes.

630. **Expériences de M. Cailletet.** — 1° *Principe de la méthode.* — Dans l'appareil de Thilorier et dans celui de Faraday, c'est le gaz qui se comprime lui-même, en se produisant en vase clos. Dans le remarquable appareil de M. Cailletet, c'est par un moyen mécanique que la pression se produit. La méthode de compression avait été déjà employée, mais la méthode de refroidissement, qui consiste à utiliser le froid produit par la *détente même* du gaz comprimé, est aussi originale que nouvelle.

2° *Description de l'appareil.* — L'appareil se compose d'une cuve en fer

Fig. 609.

forgé BB' (*fig. 609*), *à moitié* remplie de mercure. Dans ce liquide plonge une

éprouvette TO, dont la partie supérieure, capillaire et fermée, contient le gaz à liquéfier; la partie inférieure est d'un plus fort diamètre et ouverte. Cette éprouvette est maintenue par un écrou *n*, où elle est scellée à la glu marine. Sur le côté de la cuve B est un second écrou *n'*, percé d'un conduit sur lequel est fixé un tube *t*, qui amène de l'eau refoulée par une pompe P. Les soupapes de celle-ci, l'une d'aspiration, l'autre de refoulement, sont placées sous les écrous S et S'. Un piston plongeur à vis, commandé par un volant X, sert à forcer la pression, tandis qu'un robinet, manœuvré par un volant X', permet de produire la détente du gaz comprimé. Enfin un manomètre *m*, fixé sur la caisse H, marque les pressions.

Pour remplir de gaz l'éprouvette TO, on la dispose horizontalement (fig. 610), et, l'extrémité O n'étant pas encore fermée, on fait arriver le gaz bien pur et bien desséché par un tuyau de caoutchouc *b*, appliqué à l'autre extrémité.

Fig. 610.

Quand tout l'air est expulsé, on soude à la lampe l'extrémité O. On relève alors l'éprouvette verticalement et une gouttelette de mercure *a*, introduite d'avance, vient en fermer l'orifice intérieur. A cet état, on introduit l'éprouvette dans la cuve BB', on serre fortement l'écrou *n* et on visse au-dessus un plateau Q, qui porte un manchon M, rempli d'eau froide ou d'un mélange réfrigérant. Pour arrêter les éclats de verre qui seraient projetés si l'éprouvette venait à éclater, on recouvre le tout d'une cloche de cristal C; de plus, on place sous celle-ci des matières desséchantes pour empêcher le dépôt de givre qui se produirait sur le manchon, quand il contient un mélange réfrigérant.

3e *Opération.* — L'appareil est maintenant prêt à fonctionner, et si l'on fait marcher la pompe hydraulique à l'aide du levier L, l'eau aspirée du vase V et refoulée par le tuyau *t* comprime le mercure dans la cuve et le fait monter jusque dans la partie capillaire de l'éprouvette. La pression peut aller d'abord jusqu'à 400 *atmosphères*, puis jusqu'à 2500 atmosphères quand on fait manœuvrer le piston plongeur X.

On ne remarque d'abord aucun changement dans l'état du gaz comprimé; mais à une certaine pression, — qui est différente suivant le gaz et la température, — on voit un dépôt liquide ruisseler sur la paroi intérieure de l'éprouvette et s'amasser sur le ménisque de mercure; à partir de ce moment le manomètre marque une pression constante, qui est la tension maximum du gaz liquéfié.

4e *Résultats.* — M. Cailletet a liquéfié ainsi l'acétylène et le bioxyde d'azote; mais l'oxyde de carbone, l'oxygène, l'azote et l'hydrogène, à la température de — 29°, ont résisté à des pressions de 500 atmosphères.

Emploi de la détente. — Il faut alors avoir recours au refroidissement qui accompagne la détente brusque d'un gaz comprimé. Si l'on ouvre le robinet manœuvré par le volant X', la pression s'abaissant tout à coup à 1 atmosphère, le gaz, dans le tube O,

se détend instantanément, en produisant un abaissement de température d'environ 200° au-dessous du point de départ. On voit alors un brouillard plus ou moins épais se produire dans l'éprouvette, ce qui est le signe d'une liquéfaction partielle du gaz. M. Cailletet a liquéfié ainsi l'hydrogène protocarboné, l'oxyde de carbone, l'oxygène et l'azote, sous une pression qui avant la détente était de 300 atmosphères; mais dans les mêmes conditions l'hydrogène n'a présenté qu'une très légère buée, seul indice d'un commencement de liquéfaction.

631. **Expériences de M. Raoul Pictet.** — L'appareil de M. Raoul Pictet n'a pas la simplicité de celui de M. Cailletet, mais il est incomparablement plus puissant, car il réunit à d'énormes pressions un froid considérable. Comme dans l'appareil de Thilorier, c'est le gaz qui se comprime lui-même en se produisant en vase clos. Quant au refroidissement, on le commence à l'aide d'une vaporisation continue d'acide sulfureux liquide, on l'accroît par une vaporisation d'acide carbonique ou de protoxyde d'azote préalablement liquéfiés par l'acide sulfureux, on l'achève enfin par la détente du gaz comprimé sur lequel on expérimente.

632. **Expériences de MM. Wroblewski et Olszewski.** — 1° *Principe de la méthode.* — M. Cailletet, ayant comprimé l'oxygène et l'ayant refroidi jusqu'à — 100° dans l'éthylène liquéfié, avait observé le phénomène suivant : au moment de la détente, une ébullition tumultueuse se produit et persiste pendant un temps appréciable; elle ressemble à la projection d'un liquide dans la partie refroidie du tube. Il indiquait d'ailleurs lui-même le moyen d'obtenir une liquéfaction plus nette en produisant une température encore plus basse par l'évaporation de l'éthylène liquéfié.

C'est précisément ce moyen que MM. Wroblewski et Olszewski ont réalisé en 1883 [1]. En faisant le vide au-dessus de l'éthylène liquide (ainsi que Faraday l'avait fait autrefois pour le protoxyde d'azote), ils ont obtenu une température de — 136° (mesurée au thermomètre à hydrogène).

2° *Appareil.* — Enfin, ayant soumis les gaz permanents à ces basses températures dans une sorte d'appareil Cailletet (fig. 611) disposé de manière à comprimer, jusqu'à quelques centaines d'atmosphères, des quantités relativement considérables de gaz, ils ont liquéfié complètement, et avec une grande facilité, d'abord l'oxygène, puis l'azote et l'oxyde de carbone.

Le gaz à liquéfier est contenu dans la branche *qr*; il peut être comprimé au moyen d'une pompe Cailletet, attelée au bloc *bc*. L'éva-

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 16 avril 1883.

poration de l'éthylène liquide a lieu dans l'éprouvette *s* reliée à une machine pneumatique Bianchi par le tube de plomb *v*. L'éthylène liquide est contenu dans le réservoir *x*, entouré d'un mélange de glace et de sel. Il arrive en *s* par de petites ouvertures latérales ménagées à l'extrémité *c'* du tube *ww*, dont la portion *b'* est plongée dans une pâte formée d'acide carbonique solide et d'éther. Au fond de l'éprouvette à pied *y* se trouve du chlorure de calcium ayant pour but d'éviter tout dépôt de rosée sur *s*, de façon qu'il soit possible de voir tout ce qui passe dans le tube à gaz; *t* est un thermomètre à hydrogène donnant des indications sur les températures atteintes.

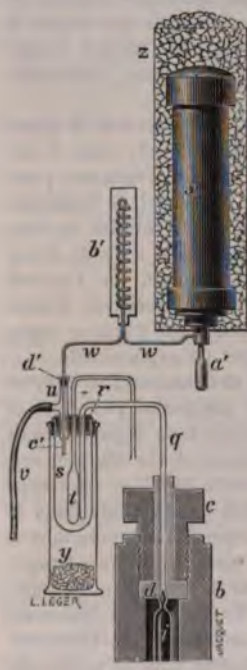


Fig. 611.

3° *Résultats.* — L'oxygène liquide est *incolore et transparent* comme l'acide carbonique. Il est très mobile et forme un ménisque très net[1].

L'azote s'est liquéfié moins aisément. Ayant été refroidi dans un tube en verre à — 136° et comprimé jusqu'à 150 atmosphères, il ne s'est pas liquéfié. Si l'on produit alors la détente *lentement* et si, en diminuant la pression, on ne descend pas au-dessous de 50 atmosphères, *l'azote se liquéfie complètement.*

Ce liquide est *incolore et transparent*, comme l'oxygène et comme l'acide carbonique. Il présente d'abord un ménisque bien distinct, mais il s'évapore si rapidement, qu'il ne reste à l'état statique des liquides stables que *pendant quelques secondes.* Il faudrait probablement le maintenir à une température inférieure à — 136° pour le conserver plus longtemps à l'état liquide.

Enfin l'oxyde de carbone a été liquéfié dans les mêmes con-

1. *Le point critique* de l'oxygène est plus bas que la température d'ébullition de l'éthylène sous la pression atmosphérique : c'est pourquoi M. Cailletet ne l'avait atteint qu'en joignant au froid dû à l'évaporation de l'éthylène le froid résultant de la détente.

ditions que l'azote. Le liquide était incolore, le ménisque était très visible (21 avril 1883).

633. Température critique des gaz. — Expériences d'Andrews. — Autrefois on admettait que, quelle que fût la température d'un gaz, il existait toujours une pression sous laquelle le gaz se liquéfiait; le tout était d'atteindre cette pression.

En 1869, les expériences d'Andrews sur l'acide carbonique l'ont conduit à cette conclusion qu'*il y a une température au-dessus de laquelle toute liquéfaction est impossible, quelle que soit la pression*. C'est cette température qu'il appelle *température critique*.

Ce physicien comprimait l'acide carbonique dans un tube formé d'une partie capillaire de 1,25 mm de diamètre et d'un tube plus large (2,5 mm). Le gaz pur était contenu dans la partie capillaire et partiellement dans le tube plus large où il était obturé par un index de mercure. La partie capillaire du tube à gaz émergeait seule de l'appareil et pouvait être portée à des températures connues au moyen d'un bain d'eau. Supposons que l'on comprime le gaz *à température constante*, à 13°,1 par exemple. La pression augmentant, le volume gazeux diminuait; la liquéfaction commençait sous la pression de 48^{atm},9, et l'on observait alors une brusque diminution de volume AB, comme le montre la figure 612. Puis on comprimait le *gaz liquéfié* dont la compressibilité est beaucoup moindre que celle du *gaz*.

Fig. 612.

A 21°,5, les mêmes phénomènes se passent, mais la liquéfaction est retardée (61^{atm}) et elle correspond à une diminution de volume moindre A' B'. La température s'élevant encore, le point de liquéfaction recule de plus en plus, la diminution de volume tend vers zéro. Le ménisque perd sa courbure de plus en plus; elle finit par devenir plane, indécise et par disparaître lorsque la température est voisine de 31°. Un peu au-dessus, à 32°,5 par exemple, il n'y a plus de liquéfaction, en ce sens que l'isotherme ne présente plus de partie rectiligne; il en est de même pour toutes les températures supérieures à 30°,92, qui est la *température critique* de l'acide carbonique (voir la définition des *lignes isothermes*, § 725, III).

La *pression critique* est la limite vers laquelle tend la pression de la vapeur saturée lorsque la température tend vers la température critique; si l'on considère l'unité de masse d'un corps, le volume qu'il occupe à la température critique et sous la pression critique est son *volume critique*, et sa densité, rapportée à l'eau à 4°, est sa *densité critique*. On dit alors que ce corps est à son *point critique* C.

Les nombreuses expériences faites postérieurement à Andrews ont confirmé ses conclusions et en ont montré l'absolue généralité; aussi connaît-on aujourd'hui les *éléments critiques* d'un très grand nombre de corps simples ou com-

posés. Ainsi, pour l'oxygène, le point critique est — 118°, la pression critique est 50 atmosphères et la densité critique est 0,405.

Remarque. — 1° *Courbe critique.* — Le lieu des points A et B (fig. 612) est une courbe qui a reçu le nom de *courbe critique.* Chaque fois que le point M, représentatif de l'état du fluide, tombe à l'intérieur de cette ligne, le fluide est en partie à l'état liquide, en partie à l'état de vapeur saturée. A l'extérieur, sur GA ou BL, il affecte, au contraire, un état parfaitement homogène. On peut aller de l'état P, appartenant à l'isotherme du gaz, à l'état Q, appartenant à un isotherme liquide BL, en passant par une suite continue d'états homogènes PC'Q. L'homogénéité cesse si le cycle des états successifs de la masse fluide rencontre la courbe critique. S'il s'agit de l'unité de masse du fluide, la partie rectiligne AB représente la différence des volumes spécifiques $u' - u$ de la vapeur saturée et du liquide à la température t, l'ordonnée Of représente la force élastique maxima de la vapeur à la même température.

2° *Distinction théorique d'un gaz et d'une vapeur.* — Les expériences d'Andrews permettent de préciser la notion, assez vague autrefois, de *gaz* et de *vapeur.* On peut dire avec lui qu'un corps gazeux est un gaz au-dessus de la température critique, une vapeur au-dessous. Dès lors, une vapeur peut être liquéfiée par la pression seule; un gaz ne le peut pas sans le secours d'un abaissement de température. Ainsi, l'acide carbonique est *un gaz* au-dessus de 30°92, et *une vapeur* au-dessous de cette température.

634. Explication du point critique. — 1° *Théorie de Jamin.* — Jamin fait rentrer le fait expérimental du *point critique* dans la loi générale de la vaporisation.

Soit un liquide en présence de sa vapeur saturée dans un vase dont le volume varie peu sous l'influence de la chaleur. A mesure que la température s'élève, la densité du liquide diminue de plus en plus; au contraire, la densité de la vapeur saturée augmente rapidement et d'une manière continue. Donc à une certaine température ces deux densités doivent devenir égales. La température critique serait donc *la température où un liquide et sa vapeur saturée ont la même densité.* En effet, à ce moment la vapeur ne tend plus à occuper la partie supérieure, ni le liquide la partie inférieure; la surface de séparation doit cesser d'être distincte, puis la masse se mêler avec des stries ondoyantes et mouvantes et enfin le tout devenir homogène.

Jusque-là on peut dire que la théorie de Jamin est entièrement vérifiée par l'expérience. En particulier, l'égalité des deux sortes de densités à la température critique est vérifiée par ce fait que, dans les isothermes d'Andrews, supposées en nombre infini, celle qui correspond à la température critique possède au point qui correspond à la pression critique une tangente horizontale qui est la limite des parties rectilignes des autres isothermes. L'égalité des deux densités est donc, dans cette représentation graphique, pour ainsi dire la définition du point critique. D'ailleurs, au point de vue expérimental, les physiciens qui ont étudié la variation des deux densités au voisinage de la température critique, MM. Cailletet et Mathias, Battelli, Amagat, S. Young, sont arrivés à la même conclusion.

Mais où la théorie de Jamin n'est plus vraie, c'est lorsqu'il admet que, l'état liquide persistant au delà de la température critique, la diminution de densité du liquide par la dilatation doit se continuer au delà de la température critique, de même que l'augmentation de la densité de vapeur saturée. Donc en comprimant suffisamment le gaz au-dessus de la température critique on devrait rassembler le liquide à la partie supérieure du vase et obtenir le retournement du ménisque. L'expérience n'a pas confirmé cette prévision (Cailletet).

2° *Vaporisation totale.* — Il faut bien se garder de confondre la température *critique* T_c, définie par les isothermes d'Andrews et l'égalité des deux densités, *avec la température* t_c à laquelle a lieu la vaporisation totale, c'est-à-dire *la disparition* du ménisque d'un liquide chauffé, en présence de sa vapeur,

dans un espace sensiblement double du volume initial du liquide. La température t_c, comme l'ont montré MM. Pellat, Galitzine et Stoletow, est inférieure à T_c de quelques dixièmes de degré.

655. **Courbe des densités.** — Supposons qu'on ait déterminé expérimentalement, pour un corps, la densité du liquide et celle de la vapeur saturée, et cela jusqu'à la température critique T_c. Portons en ordonnées ces deux sortes de densités, et en abscisses les températures; d'après ce qui précède, les deux courbes A et B (fig. 615) devront se *raccorder*, pour la température critique, en un point C où la tangente est parallèle à l'axe des ordonnées. La courbe ACB, considérée comme courbe unique, est la *courbe des densités*. Comme les expériences de MM. Cailletet et Mathias l'ont montré, elle a sensiblement la forme d'une parabole dont l'axe serait très peu incliné sur l'axe des abscisses. En particulier, le lieu des milieux des cordes parallèles à l'axe des ordonnées est une droite. Ce fait a été confirmé récemment par M. Amagat.

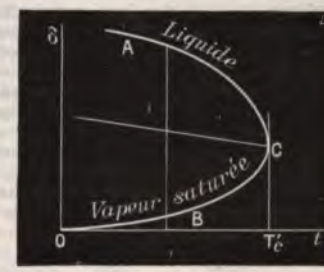


Fig. 615.

M. Mathias a montré en outre que la densité critique d'un corps est très sensiblement égale au tiers de la densité du liquide prise à la température la plus éloignée possible de la température critique.

L'expérience prouve que le coefficient angulaire du diamètre rectiligne est toujours négatif; il s'ensuit que, dans le même intervalle de température, la variation absolue de la densité du liquide est toujours plus grande que celle de la vapeur saturée.

656. **Lois des états correspondants.** — Un ensemble de lois remarquables est dû à M. Van der Waals, qui les a énoncées comme conséquences d'une formule célèbre qu'il a donnée pour représenter les isothermes de l'expérience d'Andrews.

Soient p, v, t la pression, le volume et la température centigrade de l'unité de poids d'un fluide dont les constantes critiques correspondantes sont π, φ et θ. Posons avec M. Van der Waals

$$p = \iota\pi, \qquad v = n\varphi, \qquad 273 + t = T = m\Theta = m(273 + \theta),$$

c'est-à-dire mesurons p, v et T *en prenant comme unités les constantes critiques*. Cela admis, prenons deux corps définis par

$$\pi, \varphi, \Theta \quad \text{et} \quad \pi', \varphi', \Theta'.$$

Nous dirons que les pressions p et p' sont *correspondantes* si l'on a

$$p = \iota\pi, \quad p' = \iota\pi' \quad \text{ou} \quad \frac{p}{p'} = \frac{\pi}{\pi'}.$$

Les volumes v, v' seront *correspondants* si l'on a

$$v = n\varphi, \quad v' = n\varphi' \quad \text{ou} \quad \frac{v}{v'} = \frac{\varphi}{\varphi'}.$$

Les températures $T = 273 + t$, $T' = 273 + t'$ seront *correspondantes* si l'on a

$$T = m\Theta, \quad T' = m\Theta', \quad \text{ou} \quad \frac{T}{T'} = \frac{\Theta}{\Theta'}.$$

Cela étant, les *lois des états correspondants* peuvent s'énoncer ainsi : *Si l'on considère plusieurs corps à des températures correspondantes* :

1° *Leurs pressions de vapeur saturée sont correspondantes;*

2° *Leurs densités de liquide sont correspondantes;*

3° *Leurs densités de vapeur saturée sont correspondantes.*

La première loi a été vérifiée par M. Van der Waals sur les pressions de vapeur saturée de l'éther et de l'acide sulfureux, déterminées par Sajotchewski.

La loi relative à la densité des liquides a été l'objet de vérifications particulièrement probantes de la part de M. Mathias et de M. Sydney Young. Les expériences de ce dernier physicien montrent même que la théorie des états correspondants est généralement applicable à ces densités dans *toute* l'étendue de l'état liquide, de sorte que, connaissant la densité critique d'un premier corps, on peut calculer celle d'un second corps par une simple proportion, connaissant deux densités de liquide correspondantes.

La loi relative à la densité de vapeur saturée est celle qui se vérifie le moins bien; elle n'est vraie que si l'on ne s'écarte pas trop de la température critique.

De la discussion des résultats de M. S. Young, faite par M. Mathias, il résulte que le théorème des états correspondants ne peut pas s'appliquer à tous les corps pris en bloc, mais que, si l'on groupe les corps en séries, le théorème conserve toute sa valeur pour les divers corps d'une même série.

CHAPITRE X

DENSITÉS DES VAPEURS. — MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS.

637. **Densité des vapeurs sèches. — Méthodes de détermination.** — On appelle *densité d'une vapeur sèche* le rapport qui existe entre le poids d'un certain volume de cette vapeur, non saturée, et celui d'un même volume d'air, pris à la même température et sous la même pression.

Deux méthodes principales sont employées pour déterminer les densités des vapeurs sèches : la première, due à Gay-Lussac, est applicable aux liquides qui entrent en ébullition au-dessous de 100° ou un peu au-dessus ; la seconde, due à M. Dumas, permet d'opérer à des températures qui peuvent aller jusqu'à 360° environ.

Elles sont fondées, l'une et l'autre, sur l'application de la formule

$$P = V \,.\, 1^{gr},293 \times D \cdot \frac{F}{760} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t},$$

qui donne le poids P d'un volume V de vapeur, dont la densité est

D, la température t et la force élastique F. Dans la première méthode, *on se donne d'avance* P, *on mesure* V *et* F *par l'expérience, et l'on calcule* D *par la formule.* Dans la deuxième méthode, *on se donne d'avance* V *et* F, *on mesure* P *par l'expérience et l'on calcule* D *par la formule.*

638. **Méthode de Gay-Lussac : Procédé d'Hofmann.** — Hofmann a appliqué la méthode de Gay-Lussac par un procédé très avantageux au point de vue de la simplicité de la manipulation, ainsi que de la précision des mesures.

1° *Appareil.* — L'appareil se réduit à un long tube, fermé par un bout, de 1 mètre de haut et de 2 centimètres de diamètre : il est doublement divisé, sur toute sa longueur, en *centimètres cubes* et en *millimètres* (fig. 614). Il est rempli de mercure et fixé verticalement, comme un tube de Torricelli, sur une petite cuve à mercure.

2° *Opération.* — On y introduit un poids connu P de la matière volatile, contenu dans une petite ampoule A bouchée à l'émeri (fig. 612). Le système de chauffage est à la fois plus commode et plus précis que celui de Gay-Lussac : un manchon en verre, fixé par un bouchon à quelques centimètres au-dessus de l'orifice du tube, permet de faire circuler autour du tube la vapeur d'un liquide à point d'ébullition connu, tel que l'eau, l'alcool amylique, l'aniline. Lorsque l'ampoule a été brisée et son contenu liquide complètement volatilisé, et lorsque la colonne mercurielle a pris un niveau fixe, on n'a plus qu'à noter le volume apparent occupé par la vapeur, d'où l'on déduit V, la pression atmosphérique du moment et la hauteur h de la colonne soulevée, d'où l'on déduit F ($= H - h$). On n'a pas à se préoccuper de la température t : c'est celle de la vapeur qui remplit le manchon extérieur.

Fig. 614.

3° *Calcul.* — On connaît donc tous les coefficients qui entrent dans la formule : on n'a plus qu'à en tirer D par le calcul.

Remarques. — 1° Dans le cas où les densités de vapeur sont très faibles, le procédé d'Hofmann manque de sensibilité : à cause du faible volume, le poids de gaz qui remplit l'espace est trop faible.

2° *Procédé de M. Troost.* — On peut lui donner de la sensibilité en ajoutant au tube d'Hofmann un renflement comme a fait M. Troost.

3° Le procédé d'Hofmann, pas plus que celui de Gay-Lussac, n'est applicable aux liquides dont le point d'ébullition dépasse 160°, 150° ou même 100°, car au-dessus de cette température la tension de vapeur du mercure de la cloche n'est plus négligeable. On peut se mettre à l'abri de cette cause d'erreur en retranchant *de la tension F mesurée* la tension maximum de la vapeur de *mercure qui correspond à la température* de l'expérience.

639. Méthode de M. Dumas. — 1° *Appareil et opération.* — L'appareil adopté par M. Dumas consiste simplement en un ballon de verre d'environ un demi-litre de capacité, dont on a étiré le col en pointe effilée (fig. 615).

2° *Pesée de l'air.* — Après l'avoir desséché à l'intérieur et à l'extérieur, on le pèse d'abord plein d'air sec, à la pression H et à la température ambiante t; puis, y ayant introduit le liquide dont on cherche la densité de vapeur, on le réduit en vapeurs en plongeant le ballon dans un bain à température suffisamment élevée, où on le maintient à l'aide d'un dispositif spécial indiqué dans la figure 615. On chauffe au delà de la température d'ébullition de la substance qui est en expérience. La vapeur, en se dégageant, chasse l'air qui est dans l'appareil. Au moment où cesse le jet, on ferme au chalumeau la pointe effilée du ballon, en ayant soin de noter tout de suite la température du bain et la hauteur H du baromètre. Enfin, lorsque le ballon est refroidi et essuyé avec soin, on le pèse de nouveau. Soit Q l'excès de la deuxième pesée sur la première : ce nombre représente l'excès de poids de la vapeur contenue dans le ballon, à la température t et à la pression H, sur le poids de l'air qui y était contenu primitivement.

Fig. 615.

3° *Jaugeage du ballon.* — Il faut connaître le volume du ballon à 0°. Ce jaugeage accessoire s'effectue après l'opération principale. On plonge la pointe effilée dans le mercure, et l'on en brise l'extrémité avec une pince. Comme la vapeur s'est condensée, le vide s'est fait dans le ballon, et le mercure, refoulé par la pression atmosphérique, le remplit complètement si tout l'air en a été expulsé. C'est en versant ensuite, dans une cloche graduée, le mercure qui est entré dans le ballon, qu'on détermine le volume de ce dernier à la température ambiante.

4° *Calcul de l'expérience.* — Par le calcul on en déduit le volume V à zéro, et ensuite le poids P′ de l'air contenu dans le *ballon* à la température t et à la pression H (567). Le poids P de *la vapeur* contenue dans le ballon à t degrés, et sous la pression H′, est donc P′ + Q. Connaissant P, qui est égal à H, P,

V et t, il ne reste plus qu'à résoudre la formule par rapport à D.

5° Remarques. — I. S'il restait de l'air dans le ballon après qu'on y a introduit le mercure, le ballon ne se remplirait pas complètement, mais le volume du mercure introduit n'en représenterait pas moins le volume de la vapeur. Toutefois il faudrait jauger le volume d'air qui reste dans le ballon, en le faisant passer dans une cloche graduée, et tenir compte de son poids. Soit v le volume de ce résidu d'air, *ramené à la pression* H et à la température t; on en déduit aisément son poids p par la formule connue. La correction consiste à retrancher p du poids total P de la vapeur.

II. Cette méthode donne des résultats très précis, mais elle a dans la pratique l'inconvénient d'exiger une quantité assez notable (25 ou 50 gr.) de la substance; or il n'est pas toujours facile de se procurer une aussi forte dose de certains produits. D'ailleurs la substance employée peut être conservée quand elle est rare : on emploie alors un dispositif qui permet de condenser et de recueillir l'excès de vapeur chassé du ballon par l'ébullition.

640. Densités des vapeurs saturées. — On a vu précédemment que la vapeur saturée d'un corps est entièrement définie par sa température, car sa pression ne dépend pas d'autre variable[1]. Il n'y a donc pas lieu de considérer la densité de ces vapeurs comparée à celle de l'air; aussi détermine-t-on simplement le poids spécifique absolu de ces vapeurs, c'est-à-dire le poids de 1 centimètre cube, exprimé en grammes, ou encore leur *volume spécifique*, c'est-à-dire le volume en centimètres cubes d'un gramme de vapeur saturée.

Si, pour un corps donné, p est le poids en grammes de v centimètres cubes de vapeur saturée à la température t, il existe une relation $f(p, v, t) = 0$ entre ces trois quantités; si on se donne deux d'entre elles, la troisième est déterminée; d'où l'on tire le poids spécifique $\frac{p}{v}$ de la vapeur saturée à la température t, ou le volume spécifique $\frac{v}{p}$.

Par suite, il y a trois méthodes pour déterminer le volume spécifique des vapeurs saturées :

1° On se donne t et p, et on cherche v; c'est la méthode de Gay-Lussac appliquée aux vapeurs saturées.

2° On se donne t et v, et on cherche p; c'est la méthode de Dumas appliquée aux vapeurs saturées.

3° On se donne p et v, et on cherche t; c'est la méthode de Fairbairn et Tate.

Expériences de M. Pérot. — La deuxième méthode a été appliquée par M. A.

1. A moins qu'on ne considère les vapeurs en présence de leur liquide dans des *tubes capillaires*.

Pérot. Elle consiste à produire une atmosphère de vapeur saturée, à une température connue, dans un espace vide d'air, et renfermant un ballon B (fig. 616). Ce ballon se remplit alors de vapeur saturée, et il suffit de le fermer pour qu'on puisse, par des pesées, déterminer la masse du corps qu'il contient et, par suite, déduire le volume spécifique de sa vapeur.

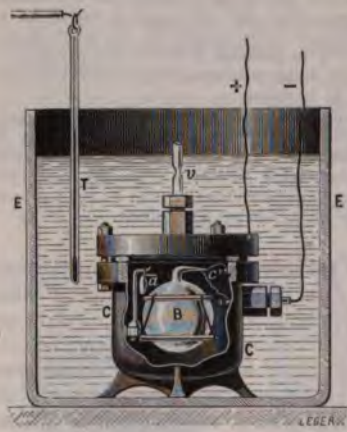


Fig. 616.

L'espace clos où l'on produit la vapeur saturée est l'intérieur d'une chaudière en bronze CC, fermée par un couvercle boulonné, et dans laquelle on peut faire le vide par un tube en verre *v*, qui passe au travers d'un presse-étoupes. A l'intérieur, sur un support, est un ballon B taré et plein d'air sec, comme ceux qu'on emploie dans la méthode de Dumas. A côté est une ampoule *a* pleine du liquide et fermée à la lampe. Après avoir fait le vide *sec*, on ferme au chalumeau le tube *v*, et la chaudière est placée dans un bain-marie E agité constamment. L'ampoule éclate et la vapeur saturée remplit le ballon B; on maintient la température fixe pendant la dernière demi-heure et on ferme le ballon à l'aide d'un courant électrique dont le circuit entoure le col. On achève l'expérience comme dans la méthode de Dumas.

Ce dispositif ne convient évidemment plus aux températures où la vapeur d'eau attaque le verre, ni pour les vapeurs saturées à très forte pression.

Résultats. — L'expérience montre que le poids spécifique absolu δ de la vapeur saturée d'un corps est sensiblement proportionnel à $\frac{P}{1+\alpha t}$ lorsque la pression est faible, mais qu'il croît ensuite beaucoup plus rapidement que ne le veut la loi de Mariotte combinée avec la loi de Gay-Lussac. δ croît constamment jusqu'à la température critique.

Le poids spécifique δ croît donc très rapidement au voisinage de la température critique. Pour les pressions inférieures ou égales à la pression atmosphérique, δ peut, au contraire, se calculer au moyen de la loi de Mariotte et de la loi de Gay-Lussac.

641. Remarque de M. E. Mathias sur les densités et les poids spécifiques des liquides. — On suppose implicitement dans la définition des densités absolues ou relatives (il en est de même des poids spécifiques) que les corps sont pris *sous la pression d'une atmosphère*. On a vu que la plus petite pression sous laquelle un liquide puisse rester *en équilibre* à la température t^0, est la pression exercée par sa vapeur saturée (*tension maxima* à t^0). Or, pour la plupart des liquides usuels, eau, alcool, éther, mercure, etc., cette pression est très *notablement* inférieure à une atmosphère; il s'ensuit que les densités déterminées *à la manière* ordinaire sont les densités de liquides comprimés. Les liquides *ordinaires* étant extrêmement peu compressibles (le coefficient de compressibilité *de l'eau* vers 4° est d'environ 0,00005 pour 1 atmosphère), les densités des

liquides sont peu altérées; mais, ce qui est plus grave, elles le sont d'une façon très différente quand on passe d'un corps à un autre, parce qu'à la même température les divers liquides ont des pressions de vapeur saturée très différentes. Par suite les liquides ne sont pas dans un état comparable et il ne peut exister de relations simples entre leurs densités prises ainsi.

Au contraire, la densité des liquides, telle qu'elle s'introduit dans les équations de la *thermodynamique* est la densité du liquide *sous la pression de la vapeur saturée*; dans ces conditions, l'état liquide est parfaitement défini par la température *seule*, et tous les liquides sont dans un état comparable.

Il serait donc *plus rationnel* de compléter la définition de l'état liquide (en ce qui concerne les densités et les poids spécifiques) en ajoutant que le liquide doit toujours être pris *sous la pression de sa vapeur saturée*.

Cette judicieuse remarque est due à M. E. Mathias : appliquée au cas de l'eau, elle montre que le maximum de densité *vrai* de ce liquide se produit quelques centièmes de degré plus haut que le maximum *apparent* observé sous la pression de l'atmosphère, et que la densité maxima absolue (1,000013) de ce liquide est trop forte d'environ $\frac{1}{20\,000}$, correction *quatre* fois plus forte que celle qui provient du kilogramme-étalon des Archives.

MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS.

642. Mélange des gaz et des vapeurs. — Lois de Dalton. — Les gaz et les vapeurs, lorsqu'ils sont sans action chimique l'un sur l'autre, se mélangent entre eux intimement comme les gaz. Ce phénomène est soumis à deux lois, découvertes par Dalton.

1° *Lorsqu'une vapeur se produit dans une atmosphère gazeuse, elle y atteint, à la même température, la même tension maximum que dans le vide.*

2° *La force élastique du mélange est égale à la somme des forces élastiques du gaz et de la vapeur mélangés* (en supposant que le volume primitif n'ait pas varié).

Vérification expérimentale. — Ces lois se vérifient au moyen d'un appareil dû à Gay-Lussac. Il consiste en un tube de verre A (fig. 617), mastiqué par ses deux extrémités à deux robinets de fer *b* et *d*; au-dessus du robinet *d* est une tubulure latérale qui met en communication le tube A avec un second tube B d'un plus petit diamètre; une échelle placée entre ces deux tubes permet de mesurer la hauteur des colonnes de mercure contenues dans chacun d'eux.

Opération. — Le tube A étant rempli de mercure sec, et les robinets *b* et *d* étant fermés, on visse en *b*, à la place de l'entonnoir C, un ballon de verre M, fermé lui-même par un robinet et rempli d'air desséché ou de tout autre gaz. Puis, ouvrant les trois robinets, on laisse écouler du tube A une partie du mercure, qui est remplacée par l'air sec du ballon. On referme alors les robinets,

et l'on ramène l'air confiné en A à la pression atmosphérique, en versant du mercure dans le tube B, jusqu'à ce que le niveau soit à la même hauteur dans les deux branches. Enfin, on substitue au ballon l'entonnoir C, muni d'un robinet particulier *a*, dit *robinet à cuvette* (fig. 617, *n*). Ayant versé dans l'entonnoir C le liquide qu'on veut vaporiser, noté le niveau *k* du mercure et ouvert le robinet *b*, on tourne le robinet *a* de manière que sa cavité se remplisse; puis on le retourne, afin que le liquide pénètre dans l'espace A et s'y vaporise. On continue à faire tomber ainsi le liquide goutte à goutte, jusqu'à ce que l'air qui est dans le tube soit saturé de vapeur : on le reconnaît à ce que le niveau du mercure *k* cesse de baisser.

Fig. 617.

1re Loi. — Comme la tension de la vapeur qui s'est produite dans l'espace A s'est ajoutée à celle de l'air qui y était déjà, le volume du gaz a augmenté; on le ramène à sa valeur initiale en versant de nouveau du mercure dans le tube B jusqu'au niveau primitif *k*. On observe alors dans les tubes B et A une différence de niveau B*o*, qui représente la tension de la vapeur produite. Or, si l'on fait passer dans le vide d'un tube barométrique quelques gouttes du même liquide volatil, on observe une dépression précisément égale à B*o*: donc, *à température égale, la tension maximum de la vapeur saturée et, par suite, sa densité sont les mêmes dans le vide et dans les gaz.*

2e Loi. — La seconde loi se trouve démontrée par la même expérience; car, lorsque le mercure a repris son niveau *k*, le mélange supporte la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet du tube B, *plus* le poids de la colonne de mercure B*o*. Or ces deux pressions représentent, l'une la pression de l'air sec, et l'autre la

tension de la vapeur. Du reste, cette seconde loi découle de la première.

Critique de l'appareil. — Expériences de Regnault. — L'appareil de Gay-Lussac ne permet d'expérimenter qu'à la température ordinaire; mais Regnault, au moyen d'un appareil qui peut être porté à différentes températures, ayant comparé successivement, dans l'air et dans le vide, les tensions des vapeurs d'eau, d'éther, de sulfure de carbone et de benzine, a constamment observé que *la tension dans l'air est plus faible que dans le vide.* Toutefois les différences sont trop petites pour infirmer la loi de Dalton; aussi Regnault pensait-il qu'on doit continuer à considérer cette loi comme rigoureusement exacte, et attribuer les petites divergences à une condensation continue de la vapeur, qui se ferait sur le verre d'une manière ininterrompue, par suite de la propriété hygroscopique de cette substance.

643. **Formules relatives aux mélanges de gaz et de vapeurs.** — I. *Étant donné le volume* V *occupé par une masse d'air sec, sous la pression* H, *on demande quel deviendra son volume* V' *quand il sera saturé de vapeur d'eau, la température et la pression restant les mêmes.*

Si l'on représente par F la force élastique de la vapeur qui sature l'air, celui-ci, dans le mélange, est seulement soumis à la pression H — F (642, 2°). On doit donc avoir, d'après la loi de Mariotte,

$$VH = V'(H - F), \qquad \text{d'où} \qquad V' = V \cdot \frac{H}{H - F}.$$

II. *Étant donné le volume d'air* V *occupé par une masse d'air saturé, sous la pression* H *et à la température* t, *quel sera son volume* V', *toujours à l'état de saturation, sous la pression* H' *et à la température* t'?

Si l'on représente par F la tension maximum de la vapeur à t degrés, et par F' la tension maximum à t' degrés, l'air sec, dans chacun des mélanges V et V', sera soumis respectivement aux pressions H — F et H' — F'. En appliquant à la masse de gaz, dans ces deux cas, la formule des gaz parfaits, on a l'équation

$$\frac{V(H - F)}{1 + \alpha t} = \frac{V'(H' - F')}{1 + \alpha t'}, \qquad \text{d'où} \qquad V' = V \cdot \frac{H - F}{H' - F'} \cdot \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

III. *On demande le poids* P *d'un volume d'air* V, *saturé de vapeur d'eau, à la température* t *et sous la pression* H $\left(\textit{la densité de la vapeur étant } \frac{5}{8}\right)$.

Remarquons d'abord que le volume V d'air saturé est en réalité un mélange de V litres d'air sec à t degrés, à la pression H diminuée de la tension de la vapeur, et de V litres de vapeur saturée à t degrés.

Or, si l'on représente par F la tension de la vapeur, la pression de l'air considéré seul sera H — F, et le problème est ainsi ramené à chercher : 1° le poids de V litres d'air sec à t degrés et à la pression H — F; 2° le poids de V litres de vapeur *saturée à t degrés et à la pression* F : on n'aura plus ensuite qu'à ajouter ces deux poids.

Or, d'une part, V litres d'air sec pèsent (en grammes)

$$[1] \qquad V \times 1{,}295 \times \frac{H - F}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t},$$

et, d'autre part, les V litres de vapeur pèsent

$$[2] \qquad V \times 1{,}295 \times \frac{5}{8} \times \frac{F}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

Enfin, en faisant la somme des poids [1] et [2], on a (en grammes)

$$P = \frac{1{,}295.V(H - F)}{(1 + \alpha t)\,760} + 1{,}295.V \times F \times \frac{5}{8} = V.1{,}295 \cdot \frac{1}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H - \frac{3}{8}F}{760}.$$

IV. *Application : Rapport entre un volume de liquide et celui de sa vapeur.* — La densité d'une vapeur étant connue, on en déduit facilement le volume qu'un poids connu de cette vapeur doit occuper, à l'état de saturation, à une température donnée. Calculons, par exemple, le volume de 1 gramme de vapeur d'eau à 100° et sous la pression 760 mm.

D'après la formule [2], 1 litre de vapeur saturée, à 100° et à la pression 0m,76, pèse (en grammes)

$$0{,}6255 \times 1{,}295 \times \frac{1}{1 + 100\alpha} = 0{,}5898.$$

Pour avoir, à la même température et à la même pression, le volume V occupé par 1 gramme de vapeur, il n'y a qu'à diviser 1 gramme par 0,5898 g; on a

$$V = 1{,}695 \text{ litre} = 1695 \text{ cm}^3.$$

Or 1 gramme d'eau à 100° occupe un volume un peu moindre que 1 centimètre cube : donc, en se transformant en vapeur à 100° et sous la pression 760 mm, l'eau prend un volume environ 1700 fois plus grand qu'à l'état liquide.

CHAPITRE XI

HYGROMÉTRIE.

644. **Définitions préliminaires.** — 1° *Objet de l'hygrométrie.* — On appelle *hygrométrie* la partie de la physique qui a pour objet la détermination de la proportion de vapeur contenue soit dans l'atmosphère, soit dans un volume d'air limité.

Le degré d'humidité de l'atmosphère ne dépend pas de la quantité absolue de vapeur d'eau qu'elle contient, mais de la tension de cette vapeur. L'air, lorsqu'il est froid, peut être très humide avec peu de vapeur, et très sec, au contraire, avec une plus grande quantité, lorsqu'il est chaud. Ainsi, l'air contient, en géné-

ral, plus de vapeur d'eau l'été que l'hiver, et cependant il est moins humide, parce que, la température étant plus élevée, la vapeur est plus loin de son point de saturation. De même, lorsqu'on chauffe un appartement, on ne diminue point la quantité de vapeur qui est dans l'air; mais on diminue l'humidité de celui-ci, parce qu'on en recule le point de saturation.

2° *État hygrométrique.* — L'air n'étant point, en général, saturé, on nomme *état hygrométrique* ou *fraction de saturation* de l'air le rapport de la quantité actuelle de vapeur d'eau qu'il renferme à la quantité qu'il contiendrait s'il était saturé, à température égale.

Autre définition. — La loi de Mariotte s'appliquant aux vapeurs non saturées, il en résulte qu'à égalité de température et de volume, le poids de la vapeur, dans un espace non saturé, varie proportionnellement à la tension de cette même vapeur. On peut donc substituer au rapport des quantités de vapeur celui des tensions correspondantes, et définir l'état hygrométrique de l'air *le rapport entre la tension de la vapeur d'eau qu'il contient et la tension qu'aurait la vapeur d'eau à la même température si l'air était saturé.*

En représentant par f la tension de la vapeur qui est dans l'air, par F celle de la vapeur saturée à la même température, et par e l'état hygrométrique, on a

$$e = \frac{f}{F}, \qquad \text{d'où} \qquad f = F \times e.$$

3° *Hygromètres.* — On nomme *hygromètres* des instruments qui servent à déterminer l'état hygrométrique de l'air. On en a imaginé un fort grand nombre, qu'on peut rapporter à quatre classes principales : les *hygromètres chimiques*, les *hygromètres à absorption*, les *hygromètres à condensation*, et les *psychromètres*.

645. **Hygromètre chimique.** — L'hygromètre chimique est moins, à proprement parler, un instrument qu'une méthode particulière d'hygrométrie.

Principe de la méthode. — Cette méthode consiste à faire passer un volume connu d'air sur une substance avide d'eau, sur du chlorure de calcium par exemple. Ayant pesé la substance avant le passage de l'air et la pesant après, on trouve un excès de poids, qui représente la vapeur qui était contenue dans l'air.

Soient p ce poids, V le volume de l'air qui a passé par le tube desséchant, t la température, f la tension actuelle de la vapeur, et 0,622 sa densité, on a

$$p = V \,.\, 1{,}292 \,.\, 0{,}622 \cdot \frac{1}{1 + \alpha t} \cdot \frac{f}{760}.$$

Dans cette équation tout est déterminé directement, sauf f qu'on en déduit.

Opération. — Pour faire passer à volonté un volume d'air plus ou moins considérable, on se sert de deux réservoirs de laiton A et B (fig. 618), identiques, qui sont fixés à un même axe autour duquel on les fait alternativement basculer. De plus, ils communiquent entre eux par une tubulure centrale, tandis que, par deux tubulures pratiquées dans l'axe, ils sont toujours en communication, le réservoir inférieur avec l'atmosphère, et le supérieur, par l'intermédiaire d'un tube de caoutchouc, avec une série de tubes M, N, remplis de chlorure de calcium ou de pierre ponce sulfurique. Le premier de ces tubes, N, est destiné à absorber la vapeur d'eau contenue dans l'air aspiré; le second, M, arrête la vapeur qui tend à passer des réservoirs dans le tube N.

Le réservoir inférieur étant plein d'eau et l'autre plein d'air, on fait basculer l'appareil, de manière que le liquide s'écoule lentement de A en B. Le vide se

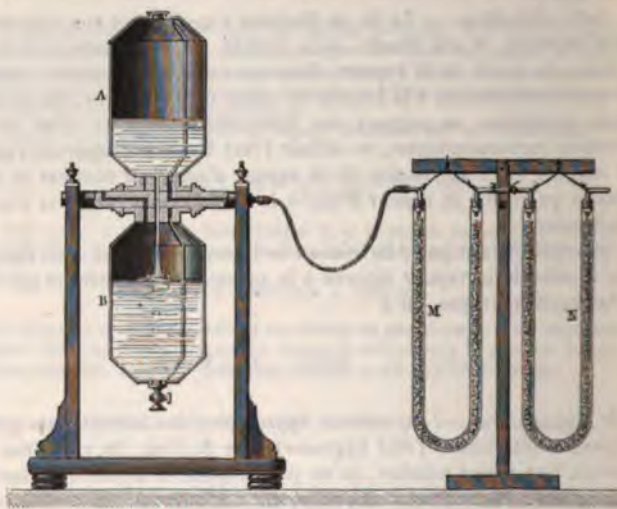


Fig. 618.

faisant en A, l'air rentre par les tubes N, M, et abandonne sa vapeur d'eau dans le premier. Quand toute l'eau s'est écoulée en B, on fait basculer de nouveau l'appareil; le même écoulement recommence et le même volume d'air est aspiré à travers le tube N. Si la capacité de chaque réservoir est de 10 litres, et qu'on ait fait basculer cinq fois l'appareil, 50 litres d'air ont traversé le tube N et s'y sont desséchés.

Calcul de l'expérience. — Le volume d'air fourni directement par l'appareil n'est pas celui qui doit être porté dans la formule ci-dessus. En effet, l'air qui est entré dans l'aspirateur s'y est saturé d'humidité à la température t de l'expérience; il y a donc pris la pression $H - V$, V étant la tension maximum correspondante à la température t, et il y occupe le volume U. Or cette masse d'air avait précédemment dans l'atmosphère

la pression $H - f$, et elle y occupait le volume V, dont nous avons besoin. La loi de Mariotte donne

$$V(H - f) = U(H - F), \qquad \text{d'où} \qquad V = U \cdot \frac{H - F}{H - f}.$$

Tel est le volume V qui doit être porté dans l'équation ci-dessus.

646. **Hygromètre à cheveu.** — 1° *Principe.* — L'*hygromètre à cheveu*, inventé par Saussure, est le type des *hygromètres à absorption*, instruments fondés sur la propriété qu'ont certaines substances organiques de s'allonger par l'humidité et de se raccourcir par la sécheresse.

2° *Description de l'hygromètre de Saussure.* — Il se compose d'un cheveu *c*, tendu sur un cadre de cuivre (fig. 619) après avoir été dégraissé préalablement dans une solution au centième de sous-carbonate de soude [1].

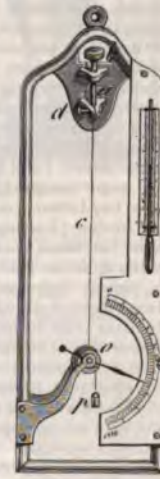


Fig. 619.

Il est maintenu, à son bout supérieur, par une pince serrée avec une vis de pression *d*. Cette pince s'élève ou s'abaisse, pour tendre le cheveu, au moyen d'une vis *b* dont l'écrou, placé au-dessus de *a*, est fixe. Si le cheveu était noué, il en résulterait une torsion qui rendrait l'allongement irrégulier. A sa partie inférieure, il s'enroule sur une poulie à deux gorges *o*, à laquelle il est fixé. Sur la deuxième gorge s'enroule en sens contraire un fil de soie qui supporte un petit poids *p*. Enfin l'axe de la poulie porte une aiguille qui se meut sur un cadran gradué. Quand le cheveu se raccourcit, sa contraction relève l'aiguille; lorsqu'il s'allonge, le poids *p* la fait descendre.

Graduation du cadran. — Point d'extrême sécheresse (*zéro*). — On place l'hygromètre sous une cloche de verre dont on dessèche l'air à l'aide de substances très avides d'eau. Au bout de *quinze* à *vingt jours* seulement, le cheveu cesse de se raccourcir et l'aiguille reste stationnaire. Cela indique que l'air de la cloche est complètement desséché : on marque alors zéro sur le cadran, au point correspondant à la pointe de l'aiguille.

Point d'extrême humidité (*degré* 100). — On retire les matières

1. On peut aussi le dégraisser en le plongeant dans de l'éther sulfurique pendant vingt-quatre heures, ainsi que l'a fait Regnault. S'il n'était pas dégraissé, il n'absorberait que peu de vapeur, et son allongement serait très faible.

desséchantes de la cloche, et l'on en mouille les parois avec de l'eau distillée. Celle-ci s'évapore, sature bientôt l'air de la cloche, et le cheveu s'allonge rapidement. Le contrepoids p fait alors tourner l'aiguille à l'opposé du zéro. En moins de *deux heures*, elle est devenue stationnaire : on marque 100 au point où elle s'arrête. On partage l'intervalle compris entre ces deux points en 100 parties égales : ce sont les degrés de l'hygromètre.

Remarques. — 1° D'après Saussure, un cheveu tendu par un poids de 3 décigrammes s'allonge, entre 0° et le degré 100, de $\frac{1}{40}$ de sa longueur. Les cheveux blonds sont ceux dont l'allongement est le plus régulier.

2° On peut négliger les allongements du cheveu qui seraient dus aux variations de température, car la dilatation correspondante à une différence de 35° dans la température de l'air ne déplace l'aiguille que des $\frac{3}{4}$ d'un degré de l'hygromètre. Abstraction faite de cette faible dilatation, on observe que, quelle que soit la température, l'aiguille de l'hygromètre revient toujours exactement au 0° dans l'air parfaitement sec, et au degré 100 dans l'air saturé : le cheveu absorbe donc toujours la même quantité d'eau, quelles que soient la température et la densité de la vapeur.

617. **Table de graduation de Gay-Lussac.** — L'expérience montre que les indications de l'hygromètre à cheveu ne sont *nullement proportionnelles* à l'état hygrométrique de l'air. Ainsi, lorsque l'aiguille marque 50, l'air est loin d'être à moitié saturé, l'état hygrométrique est inférieur à 0,3. Il a donc fallu déterminer *empiriquement* l'état hygrométrique correspondant à chaque degré du cadran. Gay-Lussac y est parvenu à l'aide d'un artifice expérimental fondé sur le fait suivant : *Les vapeurs émises par une dissolution saline ou acide ont une tension maximum d'autant plus faible, pour une même température, que la quantité de sel ou d'acide dissous est plus considérable* (605).

On plaçait l'hygromètre à cheveu sous une cloche dans laquelle était un mélange d'eau et d'acide sulfurique, et on notait le degré marqué par l'hygromètre dans cette atmosphère saturée. On obtenait la tension correspondante de la vapeur sous la cloche, en faisant passer dans le vide d'un baromètre quelques gouttes de la même dissolution acide. En cherchant enfin, dans les tables des forces élastiques, la tension de la vapeur saturée à la température de l'air sous la cloche, on avait les deux termes du rapport qui représente l'état hygrométrique de l'air correspondant au degré marqué par l'hygromètre. Gay-Lussac construisit aussi une table donnant les états hygrométriques de 5 en 5, à la température des expériences, qui était de 10°.

Expériences de Regnault. — Selon Gay-Lussac, cette table de graduation était applicable à tous les hygromètres à cheveu. Mais Regnault a reconnu que les indications de ces instruments varient avec l'origine des cheveux, leur couleur, leur finesse, le mode de dégraissage : en sorte que, pour obtenir des indications précises, il faut une table particulière pour chaque hygromètre. Cela prouve combien ces instruments offrent d'incertitudes et de difficultés.

Remarque. — On voit, par exemple, que l'hygromètre à cheveu marque 72 quand l'air est à moitié saturé ($e = 0,5$) : c'est ce degré que marque le plus souvent l'hygromètre à la surface du sol ; on en conclut que l'air contient, en moyenne, la moitié de la vapeur nécessaire pour le saturer. Dans nos climats, *l'hygromètre* ne descend jamais jusqu'à 100, même après les pluies les plus *abondantes*. Pendant les plus grandes sécheresses, il monte rarement au delà *de 30* ($e = 0,148$). Lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère, l'aiguille marche, en *général*, vers le zéro.

648. **Hygroscopes.** — A la catégorie des hygromètres à absorption, on doit rattacher les *hygroscopes*, appareils qui indiquent bien s'il y a plus ou moins de vapeur d'eau dans l'air, mais qui n'en font pas connaître la quantité. Ces instruments sont fondés sur la propriété qu'ont les cordes et les boyaux tordus de se détordre par l'action de l'humidité, et de se tordre davantage par la sécheresse. On en construit de plusieurs sortes : les plus employés sont ceux auxquels on donne la forme de petits personnages, par exemple de capucins, dont la tête se couvre d'un capuchon ou se découvre (fig. 620, I), selon que l'air est plus ou moins humide. Les mouvements de la pièce mobile sont produits par un petit boyau tordu, qui s'y attache d'un bout et est relié de l'autre bout à un point fixe (fig. 620, II). Ces hygroscopes sont paresseux, c'est-à-dire qu'ils fonctionnent très lentement et que leurs indications sont toujours en retard sur les variations hygrométriques de l'air ; de plus, ils sont fort peu sensibles.

Fig. 620.

649. **Hygromètres à condensation.** — Les hygromètres à condensation sont construits d'après un principe tout différent.

1° *Principe.* — Si l'on refroidit progressivement un corps tel que le vase en verre A (fig. 621), placé dans une atmosphère non saturée, il arrive un moment où l'air qui est en contact avec la surface du vase, et qui se refroidit en même temps, atteint la température où la vapeur d'eau qu'il contient devient saturante. Cette vapeur se condense alors, et se dépose en *buée* ou *rosée* à la surface refroidie. Un thermomètre intérieur indique, sur cet instant, la température du *point de rosée*, c'est-à-dire la température de saturation de la couche d'air ambiante.

Fig. 621.

De cette simple observation on peut déduire l'état hygrométrique du lieu. En effet, dans un espace libre qui contient un mélange d'air

et de vapeur non saturée à la pression atmosphérique, lorsque la température *s'abaisse*, la force élastique de la vapeur *reste constante*, car elle augmente autant par la diminution de volume du mélange gazeux qu'elle décroît par l'abaissement de température. Or cette tension, qui, à la température initiale, était plus ou moins inférieure à la tension maximum, finit nécessairement par devenir maximum lorsque la température s'abaisse indéfiniment ; et, pour peu que la température s'abaisse encore, le point de saturation est dépassé, et il y a condensation. Cet instant est indiqué précisément par la production de rosée.

Si donc on cherche, dans les tables de forces élastiques, la tension f correspondante à la température du point de rosée, cette tension sera précisément celle que possédait la vapeur d'eau au moment de l'expérience. En prenant aussi, dans les mêmes tables, la tension maximum F de la vapeur à la température extérieure de l'air, le quotient $\frac{f}{F}$ représentera l'état hygrométrique de l'atmosphère.

Fig. 622.

2° *Exemple numérique.* — La température de l'air étant 15°, supposons que le *point de rosée* soit 5°. On trouve dans les tables, pour les tensions correspondantes à 5° et à 15°, f égal à 6,544 mm et F égal à 12,600 mm : ce qui donne 0,514 pour le rapport $\frac{f}{F}$.

3° *Types divers d'hygromètres à condensation.* — Les divers hygromètres fondés sur ce principe ne diffèrent entre eux que par la facilité plus ou moins grande de production de la rosée, et par la précision de l'observation du point de rosée. L'hygromètre de Daniell, le premier en date, n'a plus qu'un intérêt historique. Il a été perfectionné successivement par Regnault et par Alluard.

650. **Hygromètre de Daniell.** — Description. — Il se compose de deux boules de verre bleu (verre au cobalt), réunies par un tube deux fois recourbé

(fig. 622). La boule A est aux deux tiers remplie d'éther, où vient plonger un petit thermomètre renfermé dans le tube. Les deux boules et le tube ont été complètement purgés d'air.

Opération. — La boule B étant enveloppée de mousseline, on verse de l'éther par-dessus, goutte à goutte. Ce liquide, en se vaporisant, refroidit la boule et ce refroidissement produit dans la boule A la distillation de l'éther : celle-ci se refroidit à son tour; il en est de même de la couche d'air qui est au contact de la boule, et l'on voit se déposer la rosée, sous la forme d'un anneau, à la hauteur de la surface libre du liquide.

631. **Hygromètre de Regnault.** — *Description.* — Cet instrument se compose de deux dés d'argent, à parois minces et polies (fig. 623) où s'ajustent deux tubes de

Fig. 623.

verre D et E munis chacun d'un thermomètre très sensible. Le bouchon du tube D est traversé par un tube A ouvert à ses deux bouts et plongeant jusqu'au fond du dé. De plus, le tube D est mis en communication par le pied même du support et par un tuyau de plomb avec un aspirateur G rempli d'eau. Le tube E ne communique pas avec l'aspirateur; il contient seulement un thermomètre.

Opération. — On verse de l'éther dans le tube D, jusqu'au milieu environ, puis on ouvre le robinet de l'aspirateur. L'air aspiré par le tube A passe au travers de l'éther qu'il vaporise en partie, et qu'il refroidit ainsi d'autant plus vite que l'écoulement est plus rapide. Il vient un moment où le refroidissement détermine un dépôt de rosée sur le dé. On note alors la température du thermomètre *T; au moment où la buée* disparaît, on marque de nouveau la température *du même thermomètre*, et l'on prend la moyenne pour la température

du point de rosée. On a ainsi les éléments nécessaires pour calculer l'état hygrométrique.

652. **Hygromètre d'Alluard.** — *Principe.* — Alluard a notablement perfectionné, — tout en le simplifiant, — l'hygromètre de Regnault. Son appareil se distingue par les deux points suivants: 1° la partie sur laquelle le dépôt de rosée doit être observé est *une face plane* A, bien polie, en argent ou en laiton doré (fig. 624); 2° cette face plane est encadrée dans une lame d'argent ou de laiton B, dorée et polie elle-même, qui ne la touche pas, et qui, n'étant jamais refroidie, conserve toujours le même éclat. Il en résulte que le dépôt de rosée s'observe avec tant de netteté sur la surface A, qu'on ne trouve presque pas de différence entre la température de dépôt et celle de la disparition de la rosée.

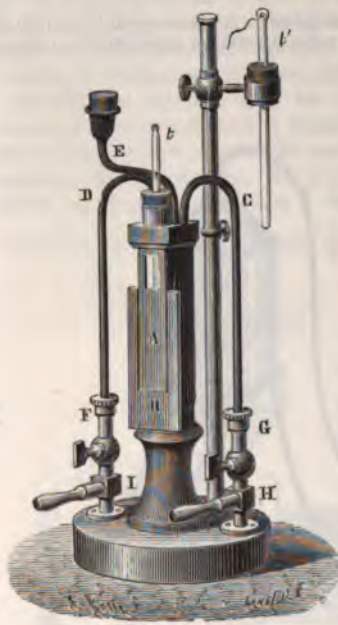


Fig. 624.

Description. — L'appareil a la forme d'un prisme droit à base carrée. Trois petits tubes de cuivre CG, DF et E traversent le couvercle supérieur; CG pénètre jusqu'au fond et les deux autres débouchent en haut. Le tube E est muni d'un entonnoir pour introduire l'éther. On produit l'évaporation et le refroidissement soit à l'aide d'un aspirateur lorsqu'on opère à poste fixe, soit à l'aide d'un petit soufflet à souffle continu lorsqu'on opère en voyage. Dans le premier cas, l'aspirateur est relié à l'appareil au moyen d'un tube en caoutchouc attaché en I. Dans le deuxième cas, le soufflet est adapté au moyen d'un tube en caoutchouc fixé en H. Deux petites fenêtres permettent de juger de l'agitation que produit dans l'éther soit l'aspiration, soit le refoulement de l'air.

Enfin, une tubulure centrale laisse passer un thermomètre t

qui, se trouvant placé au milieu du liquide qui s'évapore, donne exactement le *point de rosée*. Un autre thermomètre t' donne la température ambiante.

653. **Psychromètre.** — Le *psychromètre*[1] fait connaître indirectement le degré d'humidité de l'atmosphère par la vitesse de l'évaporation subie par un corps mouillé qui y est exposé[2].

1° *Description.* — L'instrument se compose de deux thermomètres A et B (fig. 625), fixés parallèlement sur une plaque de cuivre, de part et d'autre d'un tube C contenant de l'eau distillée. Le réservoir B est enveloppé d'une mousseline; une mèche de coton, partant de l'extrémité inférieure du tube C, amène l'eau sur la mousseline et la maintient humectée. Refroidi ainsi par l'évaporation qui se produit à sa surface, le thermomètre B marque constamment une température inférieure à celle du thermomètre A; la différence est d'autant plus grande que l'évaporation est plus rapide et, par suite, que l'air est plus éloigné de son point de saturation.

Fig. 625.

2° *Formule du psychromètre.* — C'est de cette différence des températures $(t - t')$ qu'on déduit la tension x de la vapeur dans l'air ambiant. On se sert, pour cela, de l'équation

$$[1]\ A\,(t - t') = \frac{F' - x}{H},\ \text{d'où l'on tire}\ x = F' - AH\,(t - t'),$$

où t représente la température du thermomètre sec, t' celle du thermomètre mouillé, F' la tension de la vapeur saturée à t' degrés, H la pression atmosphérique, et A un coefficient qui est constant pour un même instrument.

Cette équation exprime que *la chaleur reçue par le thermomètre mouillé* (laquelle, d'après la loi de Newton que nous verrons plus loin, est proportionnelle à la différence $t - t'$) *est égale à la chaleur enlevée par l'évaporation* (laquelle, d'après Dalton, est directement proportionnelle à la différence $F' - x$ et inversement proportionnelle à H). Cette sorte d'équilibre est atteint lorsque le thermomètre mouillé a pris une température fixe t'.

3° *Opération.* — On commence par déterminer A : pour cela, on fait une première expérience où l'on mesure x directement, à l'aide d'un hygromètre; puis on substitue la valeur ainsi trouvée à la place de x dans l'équation [1], qui

1. De ψυχρός, *froid*, et μέτρον, mesure.
2. *L'idée première en est due à Leslie*; mais c'est August qui lui a donné la *forme usitée.*

donne alors, pour des valeurs particulières de $(t-t')$, F' et H, la valeur inconnue de A. Une fois cette constante connue, l'équation est propre à fournir ensuite les valeurs de x correspondantes aux différentes valeurs de t et de t', observées à l'aide du psychromètre.

4° *Critique de l'instrument.* — Regnault a constaté que le coefficient A n'est pas absolument constant pour un même instrument : en particulier il varie avec la vitesse du vent qui le frappe, et avec l'endroit où l'appareil est placé. En outre, à la température de 0° et au-dessous, on ne peut nullement compter sur son exactitude. C'est là un grand inconvénient dans les observations météorologiques, pour lesquelles néanmoins il est presque exclusivement employé. Il y aurait avantage à lui substituer dans la pratique l'hygromètre Alluard.

654. **Formules relatives à l'hygrométrie.** — *Calculer le poids* P *d'un volume d'air humide* V *dont l'état hygrométrique est* e, *la température* t *et la pression* H.

Il faut remarquer que le volume d'air donné n'est autre chose (d'après la deuxième loi des mélanges des gaz et des vapeurs) qu'un mélange de V litres d'air sec, à t degrés et sous une pression H diminuée de la tension de la vapeur, et de V litres de vapeur, à t degrés et à la tension donnée par l'état hygrométrique : on doit donc calculer séparément le poids de l'air et celui de la vapeur.

La formule connue $f = F \times e$ sert à calculer la tension f de la vapeur qui est dans l'air, e étant donné et F se trouvant dans les tables. La tension f une fois connue, si l'on appelle f' la force élastique propre de l'air, on a

$$f + f' = H, \qquad \text{d'où} \qquad f' = H - f = H - Fe.$$

La question est donc ramenée à calculer le poids de V litres d'air sec à t degrés et à la pression $(H - Fe)$, puis celui de V litres de vapeur, également à t degrés, mais à la pression Fe. Ce problème a été traité ci-dessus, et il est résolu par les formules

$$[1] \qquad p = V \,.\, 1,293 \cdot \frac{1}{1+\alpha t} \cdot \frac{H - Fe}{760},$$

$$[2] \qquad p' = V \,.\, 1,293 \cdot \frac{5}{8} \cdot \frac{1}{1+\alpha t} \cdot \frac{Fe}{760}.$$

En ajoutant ces équations membre à membre, on a la formule définitive

$$[3] \qquad P = V \,.\, 1,293 \cdot \frac{1}{1+\alpha t} \cdot \frac{H - \frac{5}{8}Fe}{760}.$$

CHAPITRE XII

CALORIMÉTRIE

—

CHALEURS SPÉCIFIQUES DES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES. CHALEURS SPÉCIFIQUES DES GAZ.

655. **Définitions préliminaires.** — *Calorimétrie.* — Tous les effets calorifiques étudiés précédemment (variations de température, dilatations, changements d'état), ainsi que la plupart des réactions chimiques, sont accompagnés d'un dégagement ou d'une absorption de chaleur. La calorimétrie a pour objet de mesurer les quantités de chaleur qui apparaissent ou disparaissent dans ces circonstances variées.

Calorimètres. — Les méthodes de mesure sont appelées *méthodes calorimétriques*, et les appareils qui servent à les appliquer sont des *calorimètres*.

Calorie. — Enfin on mesure directement les quantités de chaleur en *calories*. La *calorie* est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1° la température soit de 1 kilogramme (*grande calorie*), soit de 1 gramme (*petite calorie*) d'eau pure.

656. **Chaleurs spécifiques.** — On constate facilement que des poids égaux de différents corps, étant placés dans les mêmes conditions physiques et en un même lieu, se comportent très différemment au point de vue calorimétrique : ils ne dégagent pas ou ils n'absorbent pas la même quantité de chaleur pour subir les mêmes effets calorifiques. Par exemple, si l'on mélange 1 kilogramme de mercure à 100° avec 1 kilogramme d'eau à 0°, on observe que, la température du métal s'étant abaissée de 97°, la quantité de chaleur qu'il a perdue n'échauffe que de 3° le même poids d'eau. L'*eau* prend donc, *à poids égal*, environ 32 *fois plus de chaleur* que le *mercure* pour une même élévation de température.

Il y a donc lieu de distinguer, dans les différentes substances, une sorte de capacité propre au point de vue calorifique; c'est ce qu'on appelle leur *chaleur spécifique*. On la définit, ou plutôt on la mesure par la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0°

à 1° la température de l'unité de poids (le gramme ou le kilogramme) de la substance.

657. **Principes fondamentaux de la calorimétrie.** — Toutes les méthodes calorimétriques sont fondées sur un certain nombre de principes ou lemmes, analogues à des postulats géométriques.

Lemme Ier. — La quantité de chaleur Q nécessaire pour élever de 1° la température d'un poids P d'un corps est proportionnelle à ce poids.

Par exemple, il faudra 10, 20,... 100 calories pour élever de 1° la température de 10 g, 20 g,... 100 g d'eau. On aura en général $Q = Pc$ (c, chaleur spécifique).

Lemme II. — Quand on mélange *à poids égaux* deux corps identiques, la température du mélange est égale à la *moyenne* des températures.

Ainsi 1 gramme d'eau à 0° et 1 gramme d'eau à 100° donnent 2 grammes d'eau à 50°. On doit en conclure que :

La *quantité de chaleur perdue* par un certain poids d'une substance, pour un abaissement de température déterminé, est égale à la *quantité de chaleur gagnée* pour une élévation de température du même nombre de degrés.

Lemme III. — La quantité de chaleur *gagnée* ou *perdue* par un corps pour une variation de température $(t' - t)$ est proportionnelle à la variation de température.

En appelant Q cette quantité de chaleur, c la chaleur spécifique et P le poids de la substance, on a

$$[1] \qquad Q = Pc\,(t' - t).$$

Cette formule suppose que c est *constant* dans les limites des températures où se fait la variation. Cela est sensiblement vrai pour l'eau et la plupart des solides entre 0° et 100° ; cela est rarement vrai pour les liquides. Nous indiquerons ci-dessous dans quelles limites ce lemme est vérifié par l'expérience. Nous verrons qu'il y a lieu de distinguer, pour la plupart des corps, la *chaleur spécifique moyenne* et la *chaleur spécifique vraie*.

658. **Capacité calorifique** ou **Valeur en eau d'un corps.** — Dans le cas de l'eau, la formule [1] se simplifie, puisque c est égal à 1 ; on aurait pour un poids M d'eau

$$Q' = M\,(t' - t).$$

Si l'on choisit M égal au poids Pc, on aura évidemment $Q' = Q$. *Le produit* Pc représente donc le poids d'eau qui nécessiterait la

même quantité de chaleur pour subir la même variation de température que le corps considéré. On peut donc définir ce produit Pc comme la *valeur en eau* de ce corps, ou encore comme ce *corps réduit en eau*.

Si la variation $(t' - t)$ se réduisait à 1°, on aurait $Q = Pc$. Le produit Pc représente donc également la quantité de chaleur qu'il faut donner au corps pour faire varier sa température de 1°. Cette quantité peut donc être considérée comme mesurant la *capacité calorifique* du corps. La chaleur spécifique n'est pas autre chose que la *capacité calorifique* d'une substance sous l'*unité de poids*.

659. **Diverses méthodes calorimétriques.** — Trois méthodes générales ont été employées pour la détermination des chaleurs spécifiques :

1° La méthode des *mélanges* (de Black);

2° La méthode de la *fusion de la glace* (de Black);

3° La méthode du *refroidissement* (de Dulong et Petit)

Nous signalerons également :

1° Le procédé du *thermocalorimètre* (de Regnault);

2° La méthode du *calorimètre à mercure* (de Fabre et Silbermann);

3° La méthode du *calorimètre à glace* (de Bunsen);

4° La méthode dite *à température constante* (du Dr d'Arsonval).

Ces quatre dernières méthodes ont été plus particulièrement employées pour la mesure des quantités de chaleur qui apparaissent ou disparaissent dans les changements d'état physique et dans les réactions chimiques.

660. **Méthode des mélanges. — Calorimètre à eau.** — La méthode des mélanges est due à Black; elle s'applique également bien aux corps solides, liquides et gazeux.

1° *Principe de la méthode.* — Supposons qu'il s'agisse d'un corps solide. Après l'avoir pesé, on le chauffe à une température connue, en le maintenant un certain temps dans un courant de vapeur à 100°, puis on le plonge dans une masse d'eau froide dont le poids et la température sont également connus. De la quantité de chaleur que le corps cède à l'eau on déduit alors sa chaleur spécifique.

Représentons par M le poids du corps, par T sa température au moment où on le plonge dans le liquide et par c sa chaleur spécifique; de même, soient m le poids de l'eau froide et t sa température initiale; enfin, soient m' le poids du vase qui contient l'eau, c' sa chaleur spécifique (supposée connue) : quant à sa température initiale, elle est évidemment égale à t.

Dès que le corps chaud est plongé dans l'eau, la température de celle-ci s'élève, et finit par atteindre une température maximum θ qui reste stationnaire. Le corps s'est donc refroidi d'un nombre de degrés égal à $(T - \theta)$, et il a, par conséquent, perdu une quantité de chaleur $Mc(T - \theta)$. L'eau et le vase, au contraire, se sont échauffés d'un nombre de degrés égal à $(\theta - t)$ et ont absorbé respectivement des quantités de chaleur égales à $m(\theta - t)$ et à $m'c'(\theta - t)$. Or *la quantité de chaleur cédée par le corps chaud est égale à la somme des quantités de chaleur absorbées par l'eau et par le vase*, en supposant qu'*aucun phénomène accessoire, capable de prendre ou de céder de la chaleur, n'intervienne*; on a donc l'équation

$$[1] \qquad Mc(T - \theta) = m(\theta - t) + m'c'(\theta - t).$$

En résolvant cette équation par rapport à l'inconnue c, il vient

$$[2] \qquad c = \frac{(m + m'c')(\theta - t)}{M(T - \theta)},$$

ou bien, en désignant par la lettre μ le produit $m'c'$ qui représente le calorimètre *réduit en eau* ou la *capacité calorifique* du calorimètre,

$$[3] \qquad c = \frac{(m + \mu)(\theta - t)}{M(T - \theta)}.$$

Remarque. — Si c' n'était pas connu, on devrait commencer par le déterminer en faisant une expérience préalable sur un poids M' de la substance du calorimètre. L'équation précédente deviendrait alors

$$[1\ bis] \qquad M'c'(T - \theta') = m(\theta' - t) + m'c'(\theta' - t)$$

et donnerait c'.

Fig. 626.

2° *Appareil.* — L'appareil le plus simple dont on fasse usage pour cette expérience est un *calorimètre à eau*. Il se compose d'un vase de laiton ou d'argent, à parois minces et polies, qu'on soutient sur un fil de soie (fig. 626) *afin d'éviter* la déperdition de la chaleur par conductibilité. *Ce vase est* rempli d'eau dans laquelle on plonge un thermo-

mètre; un agitateur de verre, *a*, sert à agiter le liquide pendant qu'on le chauffe, de manière à égaliser sa température dans tous ses points.

631. Critique de la méthode des mélanges. — Corrections usuelles. — L'équation [1] exprime algébriquement la méthode des mélanges. On peut l'exprimer en langage ordinaire en écrivant que

la chaleur perdue par le corps qui se refroidit
= la chaleur gagnée par les corps qui se réchauffent.

Or, en comparant cette expression verbale à l'équation, on voit que celle-ci n'est pas complète, car elle ne tient pas compte de tous les corps qui se réchauffent aux dépens du corps qui se refroidit.

1° *Pertes de chaleur par les accessoires.* — D'abord il y a plusieurs accessoires qui se réchauffent, et en particulier l'agitateur et le thermomètre. On corrigera cette erreur, en évaluant préalablement les capacités calorifiques μ', μ'', etc., de tous ces accessoires, et en les introduisant, à la suite de μ, dans le premier facteur du numérateur de l'équation [3].

De même, si le corps soumis à l'expérience était contenu dans une mince enveloppe en laiton (précaution indispensable dans le cas des liquides), cette enveloppe *perdrait* une certaine quantité de chaleur en se refroidissant de $(T - \theta)$ degrés. Pour en tenir compte, il suffira de déterminer préalablement la capacité calorifique μ_1 du vase, et d'ajouter ce coefficient à M. La formule [3], corrigée de ces erreurs, deviendra

$$[3\ bis] \qquad c = \frac{(m + \mu + \mu' + \mu'')(\theta - t)}{(M + \mu_1)(T - \theta)}.$$

2° *Pertes de chaleur par conductibilité et par rayonnement. — Méthode de compensation.* — En outre, le signe =, placé entre les deux membres de l'équation [1], suppose qu'il n'y a pas eu de chaleur perdue autre que la chaleur gagnée par le calorimètre. Or il a pu s'en perdre, et il s'en est perdu réellement, par deux autres voies : 1° par *contact direct* ou par *conductibilité*; 2° par *émission à distance*, ou *rayonnement*.

On évite la première cause d'erreur en posant le calorimètre sur des supports aussi minces et aussi mauvais conducteurs de la chaleur que possible. Ce sont, par exemple, soit des fils de soie comme dans le calorimètre de Regnault (fig. 624), soit trois bouchons de liège taillés en pointe comme dans le calorimètre de M. Berthelot (fig. 629)[1].

Quant à la perte de chaleur par rayonnement, on a cherché à l'éviter par une méthode dite *de compensation*, due à Rumford.

On fait une expérience préalable pour évaluer approximativement l'excès nal de la température du calorimètre. Soit, par exemple, 10° cet excès. On refroidit préalablement l'eau et le vase qui doivent servir, de 5° au-dessous de la température de l'air ambiant; puis on procède à l'expérience définitive. Le vase, dont la température était d'abord de 5° au-dessous de celle de l'enceinte, st, à la fin de l'expérience, de 5° au-dessus. Il y a donc successivement gain, puis perte de chaleur par rayonnement pendant l'expérience, et il y aurait *compensation* si les deux phases successives du phénomène étaient *de même durée*.

Mais il faut observer qu'au début la température du calorimètre varie

1. Nous verrons *ci-dessous, à propos* des gaz, comment Regnault effectuait la *correction de conductibilité.*

rapidement, à cause de la grande différence qui existe entre sa température et celle du corps qu'on y introduit et que cette vitesse de réchauffement se ralentit à mesure que la température du calorimètre s'élève. Il en résulte que la première phase de l'expérience est beaucoup plus courte que la seconde phase : il n'y aura donc qu'une *compensation insuffisante*. Aussi Regnault, qui a employé la méthode des mélanges avec un calorimètre spécial, corrigeait-il directement cette perte à l'aide d'une méthode de calcul rigoureuse[1], fondée sur la *loi du refroidissement*.

662. **Calorimètre de M. Berthelot.** — M. Berthelot, dans ses recherches de thermochimie, a appliqué la méthode des mélanges, à l'aide d'un calorimètre perfectionné.

Le calorimètre proprement dit (fig. 627) se compose d'un vase ordinairement

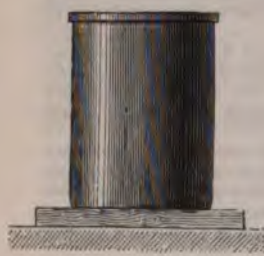


Fig. 627.

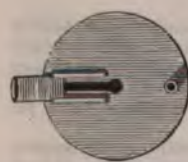


Fig. 628.

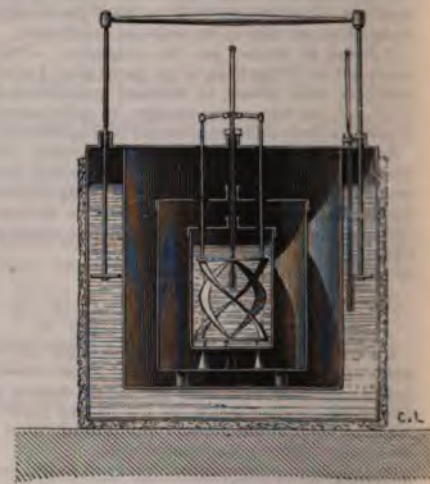


Fig. 629.

en platine, pesant 65,43 g, à parois très minces, en forme de gobelet; il est pourvu d'un couvercle (fig. 628), également en platine, qui s'agrafe *à baïonnette* sur les bords du vase, et qui est percé de diverses ouvertures pour le passage du thermomètre, de l'agitateur et des tubes adducteurs des gaz ou des liquides.

Ce vase est placé sur un support mauvais conducteur, au centre d'une première enceinte, constituée par un cylindre de cuivre rouge très mince, plaqué intérieurement d'argent poli (fig. 629). Le support isolant est formé d'un triangle de bois, armé de trois pointes de liége, sur lesquelles le calorimètre est posé directement. Le cylindre en cuivre est recouvert par un couvercle du même métal, également plaqué d'argent et muni d'ouvertures qui correspondent à celles du calorimètre.

Cette première enceinte est posée sur trois minces rondelles de liége, au

1. Nous exposerons ce calcul ci-dessous (666).

centre d'une seconde enceinte d'eau. Cette dernière est constituée par un cylindre à doubles parois en fer-blanc, entre lesquelles on loge de 10 à 40 litres d'eau. Le fond du cylindre est également double et rempli d'eau. Un agitateur circulaire permet de remuer constamment le liquide. Un couvercle de carton, recouvert d'étain et percé de trous convenables, ferme l'orifice du cylindre. Toute cette enveloppe extérieure est recouverte d'une chemise en feutre épais.

Remarques. — 1° L'adjonction de cette enceinte d'eau a pour effet de supprimer complètement l'erreur due au refroidissement et au réchauffement, *toutes les fois que la durée de l'expérience ne dépasse pas quelques minutes et que les excès de température du calorimètre ne s'élèvent pas au-dessus de 2°*. En tout cas, elle a toujours l'avantage de diminuer l'erreur et de régulariser la correction.

2° L'agitateur, qui fonctionne dans le calorimètre proprement dit, a une forme particulière. Il est formé par quatre lames hélicoïdales (fig. 629), très minces, inclinées à 45° sur la verticale et normales à la surface interne du cylindre calorimètre. Elles sont assemblées sur un cadre formé de deux anneaux horizontaux, reliés par quatre fortes tiges, dont deux, réunies par une demi-bague en bois, se prolongent de 15 centimètres au-dessus du vase. L'anneau inférieur est muni de quatre petits pieds sur lesquels l'agitateur repose au fond du calorimètre.

663. **Méthode de la fusion de la glace.** — Black avait inventé une autre méthode calorimétrique plus simple que celle des mélanges. Elle est fondée sur l'absorption de chaleur qui accompagne la fusion de la glace, et sur la connaissance de la chaleur de fusion de ce corps (sensiblement égale à 79,25 cal.).

1° *Procédé du puits de glace.* — On prend un morceau de glace compacte où l'on pratique un trou au fer chaud (fig. 630). C'est là qu'on met le corps dont on cherche la chaleur spécifique, après l'avoir chauffé à une température connue. On a d'avance dressé, au fer chaud, les bords du trou et on les recouvre d'un morceau de glace, également dressé avec soin, de manière à le fermer exactement. Lorsqu'on juge que le corps est refroidi jusqu'à zéro, on le retire, puis on enlève soigneusement l'eau de fusion et l'on en détermine le poids M avec précision.

Fig. 630.

Or soit m le poids du corps dont on cherche la chaleur spécifique C, et T sa température initiale; la chaleur qu'il a perdue en se refroidissant jusqu'à 0° est évidemment égale à mCT. *D'autre part, la chaleur* gagnée par le poids M de glace qui

au centre le corps M, les deux autres compartiment
pilée. Celle du compartiment A est destinée à être fo
et celle du compartiment B arrête la chaleur qui r
l'appareil.

Ce procédé est sujet à plusieurs causes d'erreur, et n'est plus employé aujourd'hui.

Fig. 631.

Fig.

664. Méthode du Calorimètre à glace (de Bunsen). — I
imaginé par Bunsen, en 1870, est fondé

dans le réservoir β_T, dont l'eau en se congelant augmente de volume et repousse le mercure en β. Cette pression se transmet, comme une dilatation, au mercure de la branche horizontale, qui s'avance alors d'une certaine longueur. Lorsque l'extrémité de cette colonne mercurielle se maintient fixe, l'appareil est prêt pour l'expérience.

2° *Graduation.* — La première opération consiste dans la graduation *en calories* du tube divisé. On verse dans le vase A une masse d'eau P' à la température T'. Cette eau se refroidit jusqu'à 0° au contact de la couche de glace, et lui cède P'T' calories. Cette chaleur est employée à fondre une partie de la glace, laquelle est remplacée par une quantité d'eau de même masse, mais de *volume moindre*. Il résulte donc de ce fait une contraction, qui fait remonter légèrement le niveau du mercure en β, et qui fait rentrer le niveau mercuriel en S d'un certain nombre de degrés, n'. On en conclut que

$$n' \text{ degrés du tube divisé correspondent à } P'T' \text{ calories}$$

et que, par suite,

$$1 \text{ degré du tube divisé correspond à } \frac{P'T'}{n'} = \alpha;$$

α est la *constante de l'instrument.*

3° *Opération.* — La colonne mercurielle étant de nouveau redevenue fixe, on projette rapidement dans le moufle A le corps soumis à l'expérience, et l'on observe la marche du mercure en S. Soit n le nombre de degrés dont la colonne se déplace : la variation de calories est évidemment égale à $n\alpha$. Si la colonne a avancé, comme dans l'expérience de graduation, c'est qu'il y a eu *dégagement de chaleur* dans le moufle; si la colonne a reculé, c'est qu'il y a eu *absorption de chaleur.*

4° *Exemple.* — Supposons qu'il s'agisse de déterminer la chaleur spécifique d'une substance solide ou liquide. Soit M le poids de la substance essayée, T la température initiale où on l'a portée, et c sa chaleur spécifique inconnue. La substance a évidemment cédé un nombre de calories égal à McT en se refroidissant jusqu'à 0°. On a donc l'équation

$$McT = n\alpha, \qquad \text{d'où} \qquad c = \frac{n\alpha}{MT}.$$

Remarque. — Cette méthode a l'avantage d'éviter les corrections de température, puisque toutes les opérations se font à 0°; mais il y a toujours quelque incertitude sur la température initiale T du corps soumis à l'expérience.

665. Méthodes calorimétriques à température constante. — Le calorimètre à eau, ou à tout autre liquide, a l'inconvénient de faire varier pendant l'expérience la température du liquide calorimétrique et par suite celle du corps étudié. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de mesurer une quantité qui soit fonction de la température : il faut s'arranger pour que la température ne change pas ou change très peu. On est nécessairement conduit à employer des méthodes calorimétriques *à température constante* pendant la durée d'une expérience, et telles que l'on puisse, d'une expérience à l'autre, faire changer la température : par suite, on peut étudier la loi suivant laquelle le phénomène observé varie avec la température.

I. *Expériences du Dr d'Arsonval.* — C'est M. d'Arsonval qui a le premier appliqué une semblable méthode, dans le but d'étudier la chaleur dégagée, à chaque instant, par les êtres vivants.

1° Son appareil est une application de son *enceinte à température constante.* Dans cette première enceinte, il en place une seconde à la même température, et dans celle-ci, qui est le calorimètre proprement dit, il introduit un animal. Le calorimètre ne peut subir aucun refroidissement, mais éprouve au contraire un réchauffement produit par l'animal. Cette chaleur est constamment enlevée par un courant d'eau à zéro qui traverse un serpentin logé dans les parois du calorimètre, et s'écoule au dehors après avoir pris la température de ce dernier. Un mécanisme très simple règle la vitesse du courant d'eau de façon que le calorimètre garde toujours sa température initiale. En inscrivant sur un cylindre animé d'un mouvement continu les phases de cet écoulement, on a la quantité de chaleur produite et les phases de cette production[1].

2° Cette méthode est un peu modifiée si l'on doit mesurer des absorptions de chaleur.

3° Dans une autre méthode, M. d'Arsonval a utilisé, pour absorber la chaleur dégagée par les animaux, la chaleur de vaporisation des liquides très volatils, tels que le chlorure d'éthyle, qui bout à $+12^{\circ},5$ et que l'on se procure aisément dans le commerce.

II. *Expériences de M. E. Mathias.* — Dans des recherches récentes sur la chaleur de vaporisation des gaz liquéfiés (681), M. Mathias a employé une méthode calorimétrique *à température constante* qui est exactement l'inverse de la seconde méthode proposée par M. d'Arsonval.

La méthode de M. Mathias consiste à compenser, à chaque instant, le refroidissement du calorimètre *à eau*, provenant de la vaporisation du gaz liquéfié, au moyen d'une source de chaleur connue ; celle-ci est la chaleur développée par la dilution dans l'eau du calorimètre d'un poids connu π d'acide sulfurique concentré. Cette quantité de chaleur est donnée par la formule

$$Q = \frac{a\pi}{b+\pi},$$

dont les constantes a et b ont été déterminées par un grand nombre de mesures directes de la chaleur de dilution de l'acide sulfurique employé. Une fois cette formule déterminée, il suffit d'une pesée pour connaître très exactement la quantité de chaleur introduite dans le calorimètre : on peut dire que l'on *pèse* la chaleur.

666. **Méthode du refroidissement.** — 1° *Principe.* — La méthode du refroidissement repose sur la loi du refroidissement due à Newton (697).

Considérons un système de corps ayant pour capacité calorifique $m + pc$, par exemple, un corps de poids p et de chaleur spécifique c enfermé dans un vase de capacité m ; s'il vient à subir un abaissement de température $\Delta\theta$ en une minute, la quantité de chaleur Δq, perdue par le refroidissement sera donnée par l'équation générale

$$\Delta q = (m + pc)\Delta\theta.$$

D'autre part, d'après la loi du refroidissement, cette quantité de chaleur, perdue par rayonnement, est proportionnelle à la surface rayonnante s, à son

1. La méthode de M. d'Arsonval a été récemment employée par M. C. Miculescu pour mesurer l'équivalent mécanique de la chaleur. (Thèse de doctorat, *Sorbonne*, 1891.)

pouvoir émissif μ, à l'excès de température du vase sur le milieu ambiant θ et à la durée t du refroidissement : donc on a aussi

$$\Delta Q = K\mu s\theta . t, \qquad \text{d'où} \qquad (m + pc)\,\Delta\theta = K\mu s\theta . t$$

et par suite

$$[1] \qquad = \frac{(m + pc)}{K\mu s}\,\frac{\Delta\theta}{\theta}.$$

Supposons maintenant qu'on répète l'expérience avec un corps de capacité $p'c'$, qu'on fait refroidir dans les mêmes conditions, et soit t' le temps nécessaire pour obtenir *le même abaissement de température* $\Delta\theta$, à partir de la même température initiale θ. On aura de même

$$[2] \qquad t' = \frac{m + p'c'}{K\mu s}\,\frac{\Delta\theta}{\theta}.$$

En divisant membre à membre les équations [1] et [2], on aura l'égalité

$$\frac{t}{t'} = \frac{m + pc}{m + p'c'},$$

d'où l'on peut déduire c, si m et c' sont connus.

2° *Expériences de Dulong et Petit.* — Ces physiciens ont appliqué les premiers cette méthode à la mesure de la chaleur spécifique des corps solides et liquides.

Ils employaient un petit vase d'argent V, formé de deux cylindres concentriques (fig. 655); dans la partie annulaire, ils mettaient le corps de chaleur spécifique inconnue c; la partie centrale servait pour le thermomètre calorimétrique. Lorsque le corps était solide, pour augmenter le contact entre lui, le vase et le thermomètre, on le réduisait en poudre fine qu'on tassait fortement. Le vase V était suspendu par deux fils de soie à l'intérieur d'une enceinte métallique E dont l'ouverture, assez grande pour introduire le vase V, était fermée par un bouchon supportant le thermomètre calorimétrique. L'enceinte E était plongée dans un bain de glace fondante MN, et il était possible d'y faire le vide par l'intermédiaire d'un tube tt'; l'enceinte était garnie intérieurement de noir de fumée.

Fig. 655.

Pour opérer, on chauffait le vase V à 30° ou 40°; on le plaçait dans l'enceinte entourée de glace fondante, on y faisait rapidement le vide et on observait, au compteur à secondes, le temps t que le thermomètre mettait à descendre de 10° à 5°. On répétait la même opération avec un corps de chaleur spécifique connue c', et l'on obtenait un autre temps de refroidissement t'. Soit m la valeur en eau du vase d'argent et du thermomètre, p et p' les poids des corps expéri-

montés, c et c' leurs chaleurs spécifiques moyennes entre 5° et 10°, on avait

$$\frac{t}{t'} = \frac{m + pc}{m + p'c'}.$$

Remarque. — Il est préférable de déterminer m expérimentalement une fois pour toutes, en comparant, par la méthode précédente, l'eau et un autre corps dont la chaleur spécifique aura été déterminée à l'avance par la méthode des mélanges.

3° *Expériences de Regnault. — Thermocalorimètre.* — Par la comparaison expérimentale de la méthode des mélanges et de la méthode du refroidissement, Regnault a montré que cette dernière ne donne pas de bons résultats pour les corps solides, la chaleur spécifique de ceux-ci dépendant du degré de tassement des poudres expérimentées. Au contraire la méthode donne de bons résultats pour les liquides. C'est aussi la conclusion de *Bussy*, qui a effectué sur certains liquides organiques de bonnes mesures de chaleur spécifique par la méthode du refroidissement.

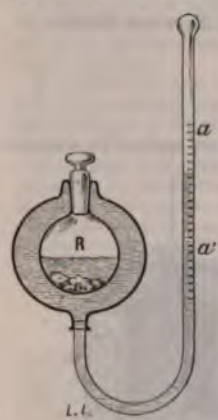


Fig. 634.

Regnault a apporté certains perfectionnements importants au mode expérimental de Dulong et Petit; mais ce qui lui appartient en propre, c'est l'invention du *thermocalorimètre*, qui lui a permis d'effectuer des mesures de chaleur spécifique à l'aide de très petites quantités de matière.

C'est un thermomètre à alcool à réservoir creux R (fig. 634) fermé par un bouchon à l'émeri; la tige, deux fois recourbée, porte une graduation dans sa partie verticale. On chauffe l'appareil de façon que le liquide monte jusqu'au haut de la tige; on met alors le réservoir R dans la glace fondante et l'on observe les temps t, t', t'' que met le liquide à descendre de la division a à la division a' : 1° quand le réservoir intérieur est vide; 2° quand on y met un poids P d'eau; 3° quand on y met un poids p d'un liquide de chaleur spécifique inconnue c.

Soit μ la constante du calorimètre, on a

$$\frac{t}{\mu} = \frac{t'}{P + \mu} = \frac{t''}{pc + \mu}; \quad \text{d'où} \quad c = \frac{P}{p}\,\frac{t'' - t}{t' - t}.$$

Il est évident que l'on peut aussi employer cet appareil à la mesure de la chaleur spécifique des corps solides.

667. Chaleurs spécifiques des solides et des liquides : Résultats généraux. — 1° *Variation avec la substance.* — L'examen des tableaux des chaleurs spécifiques montre que la chaleur spécifique est un coefficient variable d'une substance à une autre, mais que toutes les chaleurs spécifiques sont inférieures à celles de l'eau, puisqu'elles sont représentées par des nombres inférieurs à l'unité. (La plus faible est celle du mercure, qui dépasse à peine 0,03.) Cela justifie le choix qu'on a fait de l'eau pour définir *la calorie*.

2° *Variation avec l'état moléculaire.* — La chaleur spécifique varie, pour une même substance, avec son état moléculaire. Le charbon fournit un exemple très net de cette variation. Ainsi la chaleur spécifique du *diamant* est 0,15; celle du *graphite*, 0,20.

3° *Variation avec l'état physique.* — La chaleur spécifique varie, pour une même substance, avec son état physique; en général elle est *plus grande à l'état liquide* qu'à l'*état solide*. Ainsi la chaleur spécifique de la glace est la *moitié* de celle de l'eau. Celle d'un gaz est également plus petite que celle du liquide générateur.

4° *Variation avec la température.* — La chaleur spécifique est variable, pour une même substance, suivant les limites de température entre lesquelles on l'a mesurée.

Pour les corps solides, la variation est négligeable entre 0° et 100°; elle est notable et va en croissant pour les températures supérieures à 100°. Elle est d'autant plus forte que le corps solide se rapproche davantage de son point de fusion.

Pour les *liquides*, la variation avec la température est encore plus accusée. La plupart d'entre eux ont une chaleur spécifique qui n'est même pas constante entre 0° et 100°.

Pour l'*eau* les variations sont beaucoup plus faibles, mais elles ne sont pas *nulles*, ainsi que nous l'avions supposé précédemment.

668. Formules empiriques. — Chaleur spécifique moyenne et chaleur spécifique vraie. — 1° *Définition.* — Il résulte de ces faits que la quantité de chaleur qu'il faut donner à l'unité de poids d'un corps pour élever sa température de 0° à t°, n'est pas *proportionnelle* à t. Si l'on représente par Q cette quantité, on ne peut pas l'exprimer par une équation du premier degré; mais, comme elle croît lorsque la température s'élève, on pourra l'exprimer par une formule à deux ou trois termes : donc, au lieu de l'équation simple

$$Q = \alpha t, \quad \text{on aura} \quad Q = \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3; \qquad [1]$$

α, β et γ sont des coefficients constants, qu'on déterminera à l'aide de trois expériences directes, lesquelles fourniront trois équations du premier degré en α, β, γ.

Cette formule empirique étant établie, on pourra en déduire soit la *chaleur spécifique moyenne* (*entre* 0° et T°), soit la *chaleur spécifique vraie à* T°.

La chaleur spécifique moyenne entre 0° et T°, c'est *le rapport de la chaleur totale* qu'il a fallu donner pour échauffer l'unité de poids du corps de 0° à T°, *à cette température*. C'est donc $\frac{Q}{T}$. On l'obtiendra en faisant une détermination expérimentale de Q, à T°, et en portant ces nombres dans l'équation [1]. En divisant ces deux membres par T, on a

$$\frac{Q}{T} = \alpha + \beta T + \gamma T^2 = C_T. \qquad [2]$$

Si l'on prend le rapport $\frac{\Delta Q}{\Delta T}$ de l'accroissement de chaleur à l'élévation de température et qu'on passe *à la limite*, en faisant tendre ΔT vers zéro, on aura ce qu'on appelle la *chaleur spécifique vraie* de la substance à la température T. On a

$$[3] \qquad \lim \frac{\Delta Q}{\Delta T} \text{ ou } C_T = \alpha + 2\beta T + 3\gamma T^2.$$

On voit que la fonction [3], qui représente la *chaleur spécifique vraie*, se distingue de la *chaleur spécifique moyenne* par les valeurs numériques de ses coefficients.

2° *Expériences de M. Violle. — Application à la thermométrie calorimétrique.* M. Violle a déterminé ces deux chaleurs spécifiques pour le platine, à diverses températures, par la méthode des mélanges. Un thermomètre à gaz et un vase en biscuit renfermant une masse connue de platine sont introduits dans le même moufle d'un fourneau à double enveloppe, chauffé au gaz (système Perrot). La température étant devenue stationnaire à T°, la masse de platine est placée dans un cylindre entouré par l'eau d'un calorimètre. Une mesure calorimétrique fait connaître la *chaleur spécifique moyenne* du platine pour l'intervalle 0° — T°.

En faisant varier T, M. Violle a reconnu que la chaleur spécifique moyenne du platine pouvait se calculer par la formule suivante :

$$[4] \qquad C_0^T = 0{,}0317\,T + 0{,}000006\,T^2.$$

Il a trouvé de même la chaleur spécifique vraie à T° pour

l'or	$C_T = 0{,}0324 + 0{,}000095\,T$,
le palladium .	$C_T = 0{,}0582 + 0{,}000020\,T$,
l'iridium	$C_T = 0{,}0317 + 0{,}000012\,T$.

Inversement la formule [4] permet, par la détermination directe de C_0^T, d'évaluer l'intervalle de température 0° — T°.

La formule est légitime dans un intervalle [illegible] entre 0° et 1200°. C'est ainsi que M. Violle a fixé l'échelle des [illegible] qui sert dans les mesures pyrométriques.

669. Lois relatives [illegible] cifiques des atomes.

1° *Loi de D[illegible]* [illegible] sant les chaleurs spécifiques [illegible] *poids* [illegible] quantité [illegible] *f* [illegible] pro[illegible]

spécifique de l'atome, ou *chaleur atomique*. Puisque c est la chaleur spécifique de l'unité de poids, on a évidemment entre c et γ la relation $c = n\gamma$. On a d'ailleurs $1 = n\mathrm{P}$. En divisant ces deux égalités membre à membre, il vient

$$c = \frac{\gamma}{\mathrm{P}}, \qquad \text{d'où} \qquad c\mathrm{P} = \gamma = \text{constante}.$$

On peut donc énoncer cette loi en disant que :

La chaleur atomique est un nombre constant *pour tous les corps simples*, ou bien que *tous les atomes (des corps simples) ont* la même *capacité calorifique*.

3° *Loi de Neumann.* — Neumann a trouvé que *pour tous les sulfates métalliques, de la formule* $\mathrm{RO\,SO^3}$, *le produit* $c\mathrm{E}$ *est un nombre constant* (E *étant le poids équivalent du sel*).

Ce produit prend une autre valeur quand on change l'acide, par exemple lorsqu'on passe des sulfates aux carbonates, et, en général, d'une classe à une autre classe de composés, ayant un élément constant et une composition analogue.

5° *Loi de Westyn.* — *La capacité calorifique d'un corps composé est égale à* ***la somme des capacités calorifiques de chacun de ses éléments, pris avec leurs poids respectifs.***

Si l'on considère un composé de la forme $\mathrm{A}^a\mathrm{B}^b\mathrm{D}^d$ par exemple, dont la chaleur spécifique est C et si c, c', c'' sont les chaleurs spécifiques des éléments A, B, D, la loi de Westyn permet d'écrire

$$(\mathrm{A}^a\mathrm{B}^b\mathrm{D}^d)\,\mathrm{C} = a\mathrm{A}c + b\mathrm{B}c' + d\mathrm{D}c''.$$

Cette équation a été vérifiée expérimentalement par Regnault dans un grand nombre de cas. Elle est également vraie pour les alliages.

670. Chaleur spécifique des dissolutions salines étendues. — ***Formule de M. Mathias.*** — Considérons une dissolution contenant n molécules du dissolvant pour une molécule du corps dissous; M. Mathias a montré qu'à partir d'une certaine limite inférieure de n (généralement égale à 20 ou 25 pour les dissolutions aqueuses, quelquefois moindre) la chaleur spécifique γ_n de la dissolution est représentée par la formule

$$\gamma_n = \frac{a+n}{b+n}\,c,$$

où c est la chaleur spécifique du dissolvant, a et b sont des constantes.

Cette formule s'applique à toutes les dissolutions, aqueuses ou non, dont la chaleur spécifique ne présente pas de maximum.

Elle représente admirablement les expériences de M. Marignac et Thomsen; la vérification a porté sur *quatre-vingts* corps environ; l'erreur atteint rarement 5 unités du troisième ordre décimal; le *chlorure de zinc*, en dissolution aqueuse étendue, fait seul exception.

CHALEURS SPÉCIFIQUES DES GAZ.

671. Définitions. — *On définit* la chaleur spécifique des gaz comme celle des *liquides et des solides, en la rapportant* à celle de l'eau. Mais il y a pour

chaque gaz, — en raison de son état physique, — deux coefficients à considérer : 1° la chaleur spécifique *sous pression constante*, qui est l'analogue de celle des solides et des liquides; 2° la chaleur spécifique *à volume constant*.

La chaleur spécifique d'un gaz *sous pression constante*, c'est la quantité de chaleur qu'il faut donner à 1 gramme du gaz pour élever sa température de 0° à 1°, en le laissant librement dilater, sous une pression constante. Pour l'air, par exemple, ce coefficient C est égal à 0,237 cal.

La chaleur spécifique *sous volume constant*, c'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1° la température de 1 gramme du gaz, *mais sans le laisser dilater*, et par suite en maintenant son volume *constant*. Pour l'air, par exemple, ce coefficient c est égal à 0,169 cal.

On comprend que c soit moindre que C, à cause du dégagement de chaleur qui résulte de la compression même du gaz qu'on empêche de se dilater.

On ne peut déterminer directement par l'expérience que la chaleur spécifique C sous pression constante. On connaît l'autre coefficient c indirectement, par l'intermédiaire du rapport $\frac{C}{c}$ qu'on a pu mesurer directement, — nous verrons par quelle méthode, dans le chapitre consacré à la Thermodynamique.

672. **Détermination de la chaleur spécifique des gaz (sous pression constante).** — *Expériences de Regnault.* — La chaleur spécifique des gaz sous pression constante a été déterminée successivement à l'aide de deux méthodes :

La méthode *du refroidissement*, employée par Delaroche et Berard;

La méthode *des mélanges*, employée par Regnault.

Nous n'exposerons ici que cette dernière.

1° *Principe de la méthode de Regnault.* — C'est l'application directe de la méthode des mélanges aux gaz, avec certaines modifications nécessitées par l'état physique de ces corps.

On porte une masse M du gaz à une température initiale T, puis on la fait refroidir dans un calorimètre à eau dont la température initiale est θ. Soit θ' la température finale du calorimètre; comme l'expérience est nécessairement de longue durée, à cause de la nécessité de faire passer par le calorimètre une masse notable du gaz, l'abaissement de température de celui-ci doit être calculé non plus par rapport à la température finale θ', mais par rapport à une température intermédiaire entre θ et θ'; on adopte la température moyenne $\frac{\theta + \theta'}{2}$. Quant à l'échauffement du calorimètre, il est toujours représenté par $(\theta' - \theta)$. Si donc on appelle M' la masse de l'eau du calorimètre, augmentée des accessoires *réduits en eau*, l'équation de l'expérience sera

$$[1] \qquad M\left[T - \frac{\theta + \theta'}{2}\right] = M'(\theta' - \theta),$$

sauf les corrections relatives à la conductibilité et au rayonnement.

2° *Description de l'appareil.* — Le gaz, sec et pur, est conservé dans un grand réservoir (ou gazomètre) G (fig. 655, I), dont la température est maintenue constante grâce à un bain d'eau où il est immergé. La température du bain est donnée à chaque instant par le thermomètre t.

Du gazomètre partent plusieurs tubulures à robinet : une tubulure ra, communiquant avec la pompe de compression, qui sert à remplir le réservoir; une tubulure $r'a'$, communiquant avec un tube abducteur a'; une tubulure $r'a''r''$, communiquant avec un robinet *distributeur* (ou *régulateur*) R et avec un manomètre *à air libre* M.

Ce robinet R, représenté à une plus grande échelle (fig. 655, II), est destiné à *régler la vitesse d'écoulement du gaz*. Il consiste en une vis, qui peut remplir *plus ou moins*, en s'y enfonçant progressivement, le tuyau de conduite du gaz.

La tête de vis est munie d'un tambour gradué, qui se déplace devant une réglette (comme celle du sphéromètre) de manière à permettre les mouvements progressifs et réguliers. On peut s'assurer que le courant a une vitesse constante, par les indications du manomètre M : la pression marquée doit être *constante* pour une *vitesse d'écoulement déterminée*.

A la suite du manomètre se trouve un serpentin en laiton mince, immergé dans une étuve E, à eau ou à huile. C'est là que le gaz vient se réchauffer, jusqu'à la température T, avant de passer dans le calorimètre proprement dit. Un

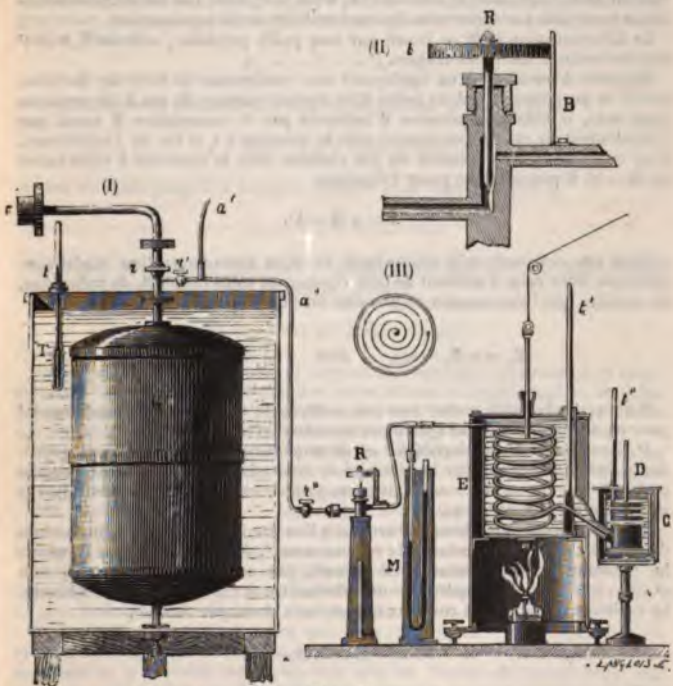


Fig. 655.

thermomètre t', plongé dans le vide du serpentin, à la sortie du gaz, sert à mesurer la température T, qui doit être celle du bain.

Enfin le calorimètre proprement dit C se compose d'un vase métallique plein d'eau, où le gaz vient se refroidir en passant dans un deuxième serpentin. Celui-ci est formé d'une série de boîtes plates en laiton s'emboîtant l'une dans l'autre, et munies chacune d'une cloison métallique en spirale (fig. 655, III), destinée à multiplier les points de contact du gaz avec la paroi. Au sortir du calorimètre, le gaz, refroidi à la température θ', s'échappe dans l'atmosphère. Un thermomètre t'' donne la température du calorimètre, et un thermomètre extérieur celle de l'atmosphère.

Remarque. — Les deux parties voisines E et C de l'appareil étant à des températures très différentes, il y avait à craindre une communication notable de chaleur par conductibilité. Afin d'atténuer autant que possible cette cause d'erreur, Regnault réunissait ces deux pièces à l'aide d'un gros tube en verre v; de plus, le tube abducteur, qui conduit le gaz dans le serpentin du calorimètre, était engagé dans un bouchon de liège, assujetti lui-même dans la tubulure v.

3° *Marche des expériences.* — Il s'agit de déterminer les coefficients qui entrent dans l'équation [1], à savoir : M, M', T, θ, θ', ainsi que les données nécessaires pour faire les corrections de conductibilité et de rayonnement.

La détermination de M' se faisait par une pesée préalable, celle de T, θ et θ' par des lectures thermométriques.

Regnault déterminait M en appliquant une conséquence de la loi de Mariotte, savoir la proportionnalité du poids d'un certain volume de gaz à sa pression. Pour cela, il notait la pression H indiquée par le manomètre M avant que l'écoulement du gaz eût commencé, puis la pression h à la fin de l'expérience. Il en concluait que la pression du gaz contenu dans le réservoir b avait baissé de $(H - h)$. Il pouvait donc poser l'équation

$$M = a(H - h),$$

a étant une *constante* qu'il déterminait, avant ou après l'opération, expérimentalement. Pour cela, il suffisait de faire écouler un poids connu M_0 du même gaz, de manière que l'abaissement de pression fût $(H_0 - h_0)$. On avait

$$M_0 = a(H_0 - h_0), \qquad \text{d'où} \qquad a = \frac{M_0}{H_0 - h_0}.$$

Il n'y avait plus qu'à porter tous ces coefficients dans l'équation ci-dessus [1] pour en déduire la chaleur spécifique inconnue C (sauf corrections).

4° *Corrections de conductibilité et de rayonnement.* — L'opération précédente était compliquée par la nécessité de déterminer les données nécessaires pour effectuer les corrections relatives au gain de chaleur par conductibilité et à la perte par rayonnement.

Soit K la variation de température qui a lieu par *minute*, par suite de la conductibilité; soit m_1 la constante de rayonnement[1], définie par la loi de Newton: la variation de température *par minute*, par suite de rayonnement, sera $m_1(\theta - t)$, θ étant la température du calorimètre et t la température ambiante. La variation totale, due à ces deux causes, sera donc, par *minute*,

$$\Delta\theta = -K + m(\theta - t).$$

Si l'on connaissait K et m, il suffirait de tenir compte de la durée de l'expérience pour avoir la somme $\Delta\theta$, laquelle constitue le refroidissement total.

Regnault observait les températures pendant 10 minutes consécutives avant l'expérience, c'est-à-dire avant le passage du gaz. En divisant par 10 la variation de température totale observée, on obtient la variation moyenne, par minute, avant l'expérience. Soit $\Delta\theta'$ cette variation observée ; on peut écrire

$$\Delta\theta' = -K + m(\theta' - t').$$

1. m est l'abaissement de température par minute pour un excès de température (sur le milieu ambiant) égal à 1°.

On recommence, à la fin de l'expérience, cette observation *à blanc*. Soit $\Delta\theta'$ la variation moyenne observée, on peut encore écrire

$$\Delta\theta' = -K + m(\theta' - t').$$

Ces deux équations déterminent les coefficients K et m.

Cela fait, voici comment on s'en servira pour calculer la correction totale $\Delta\theta$. Soient θ_1 et t_1 les températures simultanées du calorimètre et de l'atmosphère ambiante pendant la 1re minute; l'abaissement de température, pendant cette 1re minute, s'obtiendra évidemment en appliquant la formule générale de correction. On aura

$$\Delta\theta_1 = -K + m(\theta_1 - t_1).$$

Le refroidissement pendant la 2e minute sera donné de même par

$$\Delta\theta_2 = -K + m(\theta_2 - t_2),$$

et ainsi de suite, jusqu'à la dernière minute, pour laquelle on aura

$$\Delta\theta_x = -K + m(\theta_x - t_x).$$

En faisant la somme de tous ces refroidissements successifs, on aura évidemment le refroidissement total $\Delta\theta$, par la formule

$$\Delta\theta = -Kx + m\left[\Sigma(\theta_i) - \Sigma(t_i)\right].$$

Remarque. — 1° Cette méthode de correction s'applique également à la détermination des chaleurs spécifiques des corps solides et liquides par la méthode des mélanges; mais il n'y avait pas lieu de s'en servir dans le cas des solides et des liquides, parce que l'opération durait très peu, 2 ou 3 minutes à peine.

2° Ici l'expérience dure au moins 10 minutes. Malgré cela, la correction ainsi calculée était toujours extrêmement faible, environ 0°,02; et c'est là le caractère distinctif de tous les travaux de Regnault.

673. **Résultats généraux.** — Regnault a déterminé par cette méthode les chaleurs spécifiques des principaux gaz, entre 0° et 200° et sous une pression constante, voisine de 1 atmosphère.

2° Il a trouvé pour tous des chaleurs spécifiques notablement inférieures à 1, sauf celle de l'hydrogène, qui est supérieure à 3. Celle de l'air est égale à 0.237. La plus faible est celle du chlore, égale à 0.121.

3° Regnault a constaté en outre que, pour l'air et pour les gaz pris dans des conditions éloignées de leur point de liquéfaction, la chaleur spécifique est indépendante de la pression constante, ainsi que des limites de température. Par exemple, celle de l'air est rigoureusement constante depuis — 30° jusqu'à 225°.

4° La chaleur spécifique est variable avec la température et avec la pression pour tous les gaz liquéfiables ou qui n'obéissent pas à la loi de Mariotte.

5° La loi des chaleurs atomiques (loi de Dulong) ne se vérifie pas ou se vérifie mal pour les gaz.

CHALEURS DE FUSION ET DE VAPORISATION.

674. Chaleur de fusion : Définition et méthodes de mesure. — *On a vu que lorsque les* corps passent soit de l'état solide à *l'état liquide, soit de l'état liquide* à l'état solide, il y a disparition

ou réapparition d'une quantité de chaleur plus ou moins considérable.

On appelle aujourd'hui *chaleur de fusion* d'un corps solide le nombre de calories nécessaire à 1 gramme de ce corps pour passer de l'état solide à l'état liquide *sans élévation de température*.

On détermine la chaleur de fusion par deux méthodes :

1° La *méthode des mélanges*, successivement appliquée par Regnault, La Provostaye et Desains et par Person ;

2° La *méthode du calorimètre à glace* (de Bunsen).

675. **Méthode des mélanges** (cas d'une substance quelconque). — On détermine la chaleur de fusion des corps par la méthode des mélanges, en admettant que, lorsqu'un corps à l'état liquide se solidifie, il restitue une quantité de chaleur rigoureusement égale à celle qu'il avait absorbée pendant la fusion.

On fond un poids M du corps, et, après en avoir pris la température de fusion T, on le verse dans de l'eau froide dont on connaît le poids m et la température t. Appelons c la chaleur spécifique du corps à l'état solide, l sa chaleur de fusion, et θ la température finale que prend l'eau échauffée par le corps. La masse d'eau, s'étant échauffée de t à θ degrés, a absorbé une quantité de chaleur représentée par $m(\theta - t)$; le corps a cédé, d'une part, en se refroidissant de T à θ, une quantité de chaleur $Mc(T - \theta)$, et d'autre part, au moment de la solidification, une quantité de chaleur représentée par Ml. On a donc l'équation

$$Mc(T - \theta) + Ml = m(\theta - t),$$

d'où

$$l = \frac{m(\theta - t) - Mc(T - \theta)}{M}.$$

Remarque. — On peut appliquer à cette équation toutes les corrections indiquées ci-dessus pour la méthode des mélanges.

676. **Expériences de Person.** — Person a appliqué cette méthode à la détermination d'un grand nombre de chaleurs de fusion. Il en augmentait la précision en prenant la substance, non pas à sa température de fusion T, mais à une température τ supérieure à T : de sorte que, avant de se solidifier, la substance devait se refroidir de τ° à T°. Il fallait donc connaître un coefficient de plus, à savoir la chaleur spécifique C' de la substance à l'état liquide. L'équation de l'expérience était donc

$$MC'(\tau - T) + Ml + MC(T - \theta) = m(\theta - t).$$

En général C' était tout aussi inconnu que l. On faisait alors une deuxième *expérience* avec des poids différents M_1 et m_1 de la substance et d'eau : cela

fournissait une deuxième équation, qui, jointe à la précédente, permettait de trouver les deux inconnues l et C'.

Parmi les nombres qu'il a trouvés, nous citerons la chaleur de fusion de la glace, égale à 79,25 cal.

677. **Chaleur de fusion de la glace.** — La chaleur de fusion de la glace est celle dont la connaissance présente le plus d'intérêt, à cause des applications qu'on peut en faire. Elle se détermine encore par la méthode des mélanges.

C'est Black qui eut le premier l'idée de faire cette mesure.

On prend un poids M de glace à zéro et un poids m d'eau chaude à t degrés, suffisant pour fondre toute la glace. On projette celle-ci dans l'eau et, aussitôt que la fusion est complète, on mesure la température finale du mélange. Si on la représente par θ, l'eau s'étant refroidie, a cédé une quantité de chaleur égale à $m(t-\theta)$. Quant à la glace, si l'on représente par l sa chaleur de fusion, elle consomme, pour se fondre, tout en restant à la température 0°, une quantité de chaleur Ml; mais en outre, après la fusion, l'eau qui en provient s'échauffe jusqu'à θ degrés et prend alors une quantité de chaleur $M\theta$. On a donc l'équation

$$Ml + M\theta = m(t-\theta),$$

d'où on tire la valeur de l.

Black avait trouvé pour l le nombre 80.

Expériences de La Provostaye et Desains. — La même méthode fut employée par La Provostaye et Desains, avec quelques précautions supplémentaires. Ainsi le fragment de glace était bien pur, exactement à 0°, et parfaitement *desséché* avec du papier buvard. On l'introduisait dans un calorimètre dont la température initiale était un peu plus élevée que la température ambiante, de manière que la température finale θ fût un peu plus basse, du même nombre de degrés (méthode de compensation). Enfin c'était l'augmentation de poids du calorimètre qui donnait, avec exactitude, le poids M de la glace fondue.

Ils ont trouvé ainsi le nombre 79,25 cal.

678. **Chaleur de vaporisation.** — 1° *Définition.* — On a vu que les liquides, en se vaporisant, absorbent une quantité de chaleur considérable. On désigne sous le nom de *chaleur de vaporisation* d'un liquide *le nombre de calories qu'absorbe 1 gramme de ce liquide pour se vaporiser, sans élévation de température.*

2° *Détermination.* — Pour déterminer la chaleur de vaporisation d'un liquide, on admet que sa vapeur, en se liquéfiant, rend libre une quantité de chaleur précisément égale à celle qu'elle avait absorbée en se formant.

On emploie la même méthode expérimentale que pour la déter-

mination des chaleurs spécifiques des gaz. Cette méthode a été successivement appliquée par Despretz et par Regnault.

679. **Expériences de Despretz.** — 1° *Appareil et opération.* — La vapeur se produit dans une cornue C (fig. 636) où sa température est indiquée par un thermomètre, et se rend dans un serpentin noyé dans l'eau froide où elle cède sa chaleur latente en

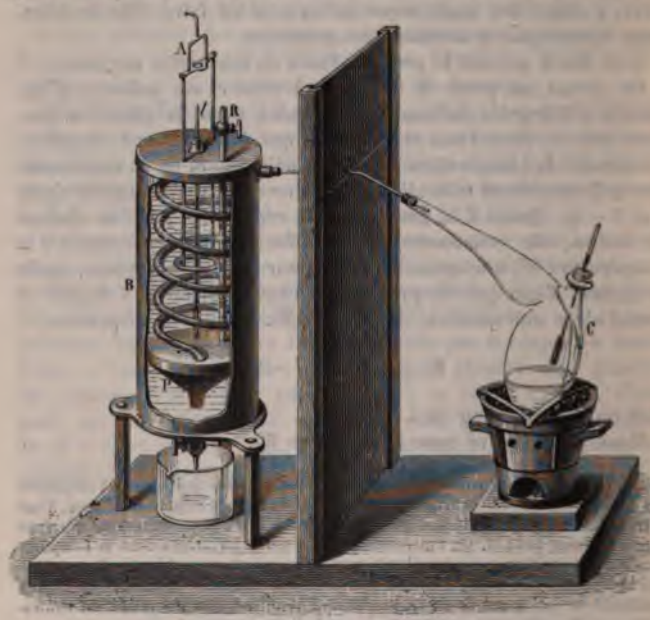


Fig. 636.

se condensant. L'eau provenant de la condensation se rend dans un récipient P, auquel aboutit le serpentin ; on l'en extrait, à la fin de l'expérience, pour la peser : son poids est égal à celui de la vapeur qui a circulé dans l'appareil. Un agitateur A, qu'on fait marcher avec la main, sert à mélanger les couches d'eau dans le vase B, de manière que toute la masse soit à la même température. Celle-ci est donnée par un thermomètre *t* placé dans l'axe du serpentin. Enfin, du récipient P part un tube à robinet R par où l'on peut faire varier la pression, et par suite la température de la vapeur, en faisant communiquer l'appareil soit avec une machine pneumatique, soit avec une pompe de compression.

2° *Calcul de l'expérience.* — Soient M le poids de la vapeur condensée, T la température qu'elle avait à son entrée dans le serpentin, et λ sa chaleur de vaporisation. Soient de même m le poids de l'eau contenue dans le serpentin, μ les poids du vase II, du serpentin, du thermomètre et de l'agitateur *réduits en eau*, t la température initiale de l'eau, et θ sa température finale. La chaleur cédée par les M kilogrammes de vapeur, par le fait seul de la condensation, est $M\lambda$; de plus, le poids d'eau M, en se refroidissant de T à θ, perd une quantité de chaleur égale à $M(T-\theta)$: donc la quantité totale de chaleur cédée par la vapeur est $M\lambda + M(T-\theta)$. D'ailleurs, la chaleur gagnée par l'eau, le vase et les accessoires est $(m+\mu)(\theta-t)$; donc on a

$$M\lambda + M(T-\theta) = (m+\mu)(\theta-t),$$

d'où

$$\lambda = \frac{(m+\mu)(\theta-t) - M(T-\theta)}{M}.$$

2° *Résultats.* — Cette méthode s'applique à tous les liquides. L'eau était celui qui présentait le plus d'intérêt, à cause des applications de sa vapeur. Despretz a trouvé ainsi pour la chaleur de vaporisation de l'eau, à 100°, le nombre 540.

Regnault, ayant repris ces mesures par une méthode très perfectionnée, a trouvé le nombre 537.

680 Chaleur totale de vaporisation. — Formules empiriques de Regnault. — Si à la chaleur de vaporisation de l'eau à 100° on ajoute la quantité de chaleur nécessaire pour amener 1 kilogramme d'eau de 0° à 100°, c'est-à-dire 100 calories, cette somme (égale à 637) représente la *chaleur totale de vaporisation de l'eau* à 100°.

Cette notion s'étend à toutes les températures auxquelles on peut vaporiser l'eau ou tout autre liquide. On appelle *chaleur totale de vaporisation à* T° d'un liquide la quantité de chaleur qu'il faut donner à 1 gramme de ce liquide pour l'amener depuis son point de fusion jusqu'à l'état de vapeur à T°.

Pour l'eau en particulier, M. Regnault a été conduit par ses expériences à la conclusion suivante. Q est une fonction de T représentée par la formule empirique

$$[1] \qquad Q = 606{,}5 + 0{,}305\,T.$$

On voit que *la chaleur totale de vaporisation de l'eau augmente* à mesure que la température *s'élève*. Ainsi elle monte de 606,5 cal. à 0° jusqu'à 637 cal. à 100° et 667,5 cal. à 200°.

Formule empirique de λ. — Au contraire la chaleur latente *diminue* quand la température *s'élève*. En effet, si λ est la chaleur latente de vaporisation à la température T, on a évidemment

$$[2] \qquad \lambda = Q - T = 606{,}5 - 0{,}695\,T.$$

Elle baisse de 606.5 cal. à 0° jusqu'à 537 cal. à 100° et 467,5 cal. à 200°.

681. Chaleur de vaporisation des gaz liquéfiés. — 1° *Expériences de Favre et Silbermann.* — Le travail le plus ancien est celui de Favre et Silbermann sur l'acide sulfureux. Ces physiciens faisaient bouillir de l'acide sulfureux liquide sous la pression atmosphérique dans le moufle de leur calorimètre à mercure. Le poids du liquide vaporisé est donné par la mesure du volume du gaz recueilli, et la quantité de chaleur absorbée par la rétrogradation du mercure dans la tige calibrée du calorimètre. On a ainsi d'une façon simple, mais peu exacte, la chaleur de vaporisation d'un corps à sa température d'ébullition sous la pression atmosphérique.

2° *Expériences de M. J. Chappuis.* — La méthode de Favre et Silbermann a été perfectionnée par M. J. Chappuis. En employant le calorimètre à glace de Bunsen, ce physicien astreint la vaporisation à se faire à 0°, et il évite la dé-

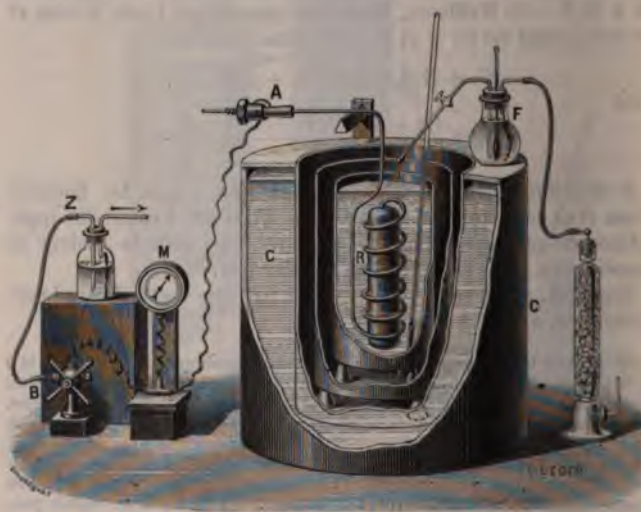


Fig. 637.

tente en forçant la vapeur à conserver sensiblement la tension maxima à cette température. Le tube de dégagement du gaz est mastiqué dans un robinet à pointeau qui sert à régulariser et à commander l'ébullition; on obtient le poids du gaz sorti de l'appareil en pesant l'appareil à vaporisation avant et après l'expérience. La vaporisation du poids p observée mesure seulement le poids de vapeur saturée *sorti* de l'instrument; on en déduit le poids π de liquide vaporisé par la formule

$$\pi = p\,\frac{\delta}{\delta - \delta'},$$

dans laquelle δ et δ' sont les densités du liquide et de la vapeur saturée du corps expérimenté, à la température zéro de l'expérience. Soit m le volume à

du mercure rentré dans le calorimètre, la chaleur de vaporisation est donnée par

$$L = \frac{1}{K}\,\frac{m}{\pi}.$$

tant une constante de l'appareil. Les expériences de M. J. Chappuis ont porté le chlorure de méthyle, l'acide sulfureux, l'acide carbonique et le cyanogène.

ur l'acide sulfureux et l'acide carbonique, le facteur de correction $\frac{\delta}{\delta - \delta'}$ a calculé au moyen des expériences de MM. Cailletet et Mathias; pour les deux

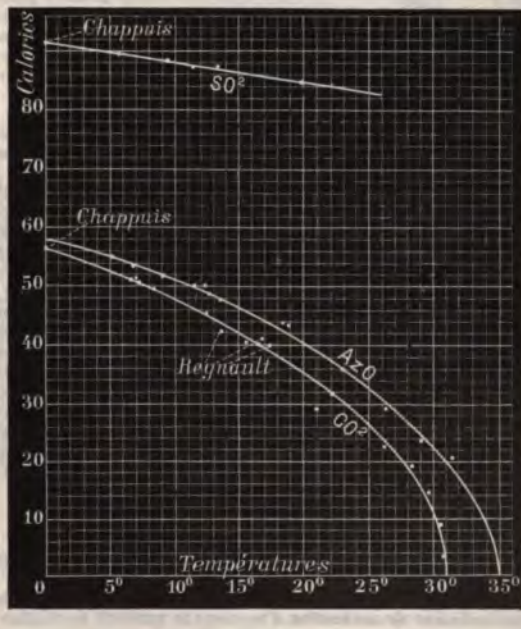


Fig. 658.

res gaz, où ce facteur a peu d'importance, la densité δ' de la vapeur saturée té calculée par l'application de la loi de Mariotte et de la loi de Gay-Lussac.

° *Expériences de M. E. Mathias.* — L'emploi du *calorimètre à eau*, combiné c la *méthode calorimétrique à température constante* (664) a permis à M. Mas d'étudier, entre 0° et 35°, la variation avec la température de la chaleur vaporisation des gaz liquéfiés.

e réservoir à gaz liquéfié est un récipient cylindrique de cuivre R (fig. 657) vant *résister à plus de 100* atmosphères, et communiquant à la partie supé-*re avec un long serpentin* de petit diamètre enroulé autour de lui. L'ex-

semble est plongé dans un calorimètre Berthelot CC et est *doré extérieurement* pour empêcher l'attaque de l'acide. Le serpentin est soudé à un robinet à pointeau A, qui communique, à l'aide d'un raccord et d'un tube de cuivre identique à celui du serpentin, avec un autre robinet à pointeau B de grandes dimensions.

L'isolement thermique du récipient R est réalisé par un raccord en *celluloïd*, dont l'une des extrémités s'adapte, par un anneau à vis, sur le côté du robinet A, l'autre extrémité se vissant sur un tube de laiton soudé lui-même au tube de dégagement du gaz.

L'appareil comprend en outre un flacon de verre F rempli d'acide sulfurique, dont la chaleur de dilution est connue, et fermé hermétiquement. Pendant tout le temps de la vaporisation du liquide, on fait couler goutte à goutte dans le calorimètre l'acide sulfurique, en ayant soin de mélanger les couches d'eau avec le thermomètre calorimétrique. On peut ainsi, avec quelques précautions, maintenir la température constante à quelques centièmes de degré près. Le robinet B sert à régler l'écoulement, dont la régularité est attestée par un barboteur à glycérine Z. La diminution de poids du récipient R permet de calculer, comme dans les expériences de M. J. Chappuis, le poids du liquide vaporisé ; la perte de poids du flacon à acide permettait également de connaître la chaleur développée par la dilution de l'acide sulfurique dans l'eau du calorimètre. On avait donc les données nécessaires pour calculer la chaleur de vaporisation du gaz liquéfié à la température constante t^0 de l'eau du calorimètre. Les variations annuelles de la température permettaient d'étudier la chaleur de vaporisation entre 0° et 22° environ. Dans les expériences faites au-dessus de la température ambiante, la méthode précédente était nécessairement modifiée.

Les expériences de M. Mathias ont porté sur l'acide sulfureux, l'acide carbonique et le protoxyde d'azote, et pour ces derniers les mesures ont été poussées jusqu'au voisinage de la température critique. Pour ces trois corps, dans les limites de température considérées, la chaleur de vaporisation est constamment décroissante, comme le montre la figure 658. Ce décroissement est linéaire pour l'acide sulfureux; pour l'acide carbonique et le protoxyde d'azote il est extrêmement rapide.

Les courbes précédentes, qui résument le travail de M. Mathias, montrent qu'au point critique la chaleur de vaporisation est rigoureusement nulle, la tangente à la courbe $\lambda = f(t)$ étant perpendiculaire à l'axe des abscisses.

La formule suivante,

$$\lambda^2 = 117,305\,(31 - t) - 0,466\,(31 - t)^2,$$

représente la chaleur de vaporisation de l'acide carbonique depuis la température critique jusqu'à des températures très inférieures à 0°.

682. Chaleur dégagée dans les réactions chimiques. — Chaleur de combustion. — On appelle *chaleur de combustion* d'un corps la quantité de chaleur qui se dégage dans la combustion de l'unité de poids du corps. Ainsi, la chaleur de combustion de l'hydrogène, brûlant dans l'oxygène, est de 34 462, d'après Fabre et Silbermann; elle est 23 785 quand il se combine avec le chlore. Celle du diamant, brûlant dans l'oxygène, est 7770.

Plusieurs physiciens, et particulièrement Lavoisier, Rumford, Despretz, Dulong, Hess, Silbermann et Fabre, Berthelot, se sont occupés de mesurer les chaleurs de combustion et de combinaison. On se sert communément aujourd'hui des calorimètres de M. Berthelot pour ce genre de recherches. Nous avons décrit le calorimètre ordinaire; voici la bombe calorimétrique usitée dans certains cas.

683. Bombe calorimétrique de M. Berthelot. — Cet appareil, assez petit pour pouvoir être immergé dans l'eau d'un calorimètre (fig. 659), est formé d'un

réservoir en acier R, doublé intérieurement d'une feuille de platine, et qui peut être fermé par un couvercle à vis C. En son centre, et perpendiculairement à son plan, le couvercle porte un tube, à l'intérieur duquel peut tourner un robinet à vis *r* dont on voit le canal sur la figure. Tout près de ce tube un fil de platine *f*, bien isolé de l'appareil, pénètre à l'intérieur de la cavité et vient se terminer près de la paroi. Il permet de faire éclater l'étincelle électrique qui devra provoquer la réaction par voie sèche dont on veut mesurer le dégagement de chaleur. Si l'on veut brûler une matière solide, le carbone par exemple, on la place dans une petite capsule de platine suspendue par un fil métallique et on détermine son inflammation par le passage d'un courant à travers un fil de platine très fin en contact avec le corps.

Fig. 639.

Fig. 640.

Il est nécessaire, pour que la combustion soit complète, de remplir la bombe avec un excès d'oxygène comprimé à la pression d'environ 25 atmosphères.

684. **Pyrhéliomètre** (de Pouillet). — Pouillet avait approprié une espèce de calorimètre à eau à la mesure de la chaleur émise par le soleil (fig. 640).

1° *Appareil.* — Le calorimètre proprement dit est une boîte cylindrique C de cuivre ou d'argent à minces parois. La face supérieure, qui doit être exposée au soleil, est recouverte de noir de fumée, de manière que l'absorption soit maximum; la face inférieure est fixée, par son centre, à un tube évidé T qui sert de support; celui-ci passe lui-même dans un collier à charnière *cc* qui permet de lui donner à la main un double mouvement de rotation et, par suite, de l'orienter convenablement. Ce mouvement est facilité par un disque D de même diamètre que la boîte, engagé perpendiculairement sur le support.

2° *Opération.* — On opère de la manière suivante : 1° on place l'instrument à l'ombre et l'on observe sa variation de température θ pendant 5 minutes; 2° on le place au soleil, en l'orientant normalement à la direction des rayons et l'on note l'échauffement T pendant 5 minutes; 3° on reporte l'instrument

à l'ombre, et l'on observe son refroidissement θ' pendant 5 minutes. On peut en conclure que l'échauffement propre dû à l'action seule du soleil, pendant 5 minutes, est

$$T + \frac{\theta' \pm \theta}{2}.$$

Nous mettons $\pm \theta$, parce que la variation de température, pendant la première phase de l'expérience, peut être soit un refroidissement, soit un échauffement. En appelant M le poids de l'eau, augmenté du *calorimètre réduit en eau*, on a évidemment pour la quantité de chaleur reçue en 5 minutes

$$Q = M\left(T + \frac{\theta' \pm \theta}{2}\right).$$

A ce nombre il faut ajouter la quantité de chaleur arrêtée par l'atmosphère avant que les rayons soient parvenus à l'appareil. Pouillet faisait cette correction à l'aide d'une formule *empirique* relative à *l'absorption atmosphérique*.

3° *Résultats.* — Pouillet a trouvé que, *si la quantité totale de chaleur que la Terre reçoit du Soleil dans le cours d'une année était tout entière employée à fondre de la glace, elle serait capable d'en fondre une couche d'une épaisseur de* 31,89 m *tout autour du globe.* Or, d'après la surface que la Terre présente au rayonnement du Soleil, et d'après la distance qui l'en sépare, elle ne reçoit qu'environ $\frac{1}{238\,000\,000}$ de la chaleur émise par cet astre.

4° *Température du Soleil.* — On a aussi cherché à déterminer la température du Soleil. En partant d'une série d'expériences faites avec l'actinomètre, M. Violle admet que la température moyenne du Soleil est de 2500°.

M. Crova, en se fondant sur les modifications subies par les raies du spectre à mesure que la température s'élève, est arrivé au nombre de 4000°. Enfin, le P. Secchi admettait 9 à 10 millions de degrés.

L'énorme discordance qui existe entre ces nombres montre que le problème est loin d'être résolu d'une manière définitive.

CHAPITRE XIII

CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE DES SOLIDES, DES LIQUIDES ET DES GAZ.

685. **Propagation de la chaleur par conductibilité.** — La chaleur d'une source calorifique se communique aux autres corps de deux manières : par *conductibilité* et par *rayonnement*. — La *conductibilité* est la propriété que possèdent les corps de *transmettre la chaleur de proche en proche dans l'intérieur de leur masse.*

Tous les corps ne conduisent pas également bien la chaleur. On appelle *bons conducteurs* ceux qui la transmettent facilement : tels sont les métaux; et l'on appelle *mauvais conducteurs* ceux qui la transmettent plus ou moins lentement : tels sont le bois,

le verre, les résines, les substances organiques et surtout les liquides et les gaz.

Ces derniers sont très employés soit pour préserver les corps chauds du refroidissement extérieur, soit pour empêcher les corps froids de se réchauffer. C'est ainsi qu'on conservera un liquide longtemps chaud en l'enfermant dans un vase à double enveloppe, dont l'intervalle est rempli de matières non conductrices, sciure de bois, verre pilé, charbon pulvérisé, paille, et que, pour conserver de la glace pendant l'été, on l'entoure de paille ou d'une couverture de laine.

686. **Conductibilité des solides.** — *Expérience d'Ingenhousz.* — Ingenhousz a comparé très simplement les solides, au point de vue de la conductibilité, à l'aide d'une petite caisse de fer-blanc ou de laiton (fig. 641) où l'on fixe, dans des tubulures à bouchons, des baguettes de diverses substances, fer, cuivre, bois et verre; elles pénètrent de quelques millimètres dans l'intérieur de la caisse, et sont recouvertes de cire jaune extérieurement. La caisse étant remplie d'eau bouillante, on voit, sur les baguettes métalliques, la cire fondre jusqu'à une distance plus ou moins grande, et sur les autres aucune trace de fusion : la conductibilité est évidemment d'autant plus grande que la partie où la cire a été fondue s'étend plus loin.

Fig. 641.

687. **Coefficients de conductibilité. — Théorie de Fourier.** — Fourier détermina par le calcul les conditions qui permettent de mesurer avec précision les *coefficients de conductibilité*, c'est-à-dire des coefficients numériques caractérisant, au point de vue de leur conductibilité, les différentes substances.

1° *Problème de la barre.* — Il résolut d'abord le problème de la conductibilité dans une barre prismatique qui serait *assez mince* pour que tous les points d'une même section transversale fussent, au même instant, *à la même température*, et *assez longue* pour que, l'une des extrémités étant maintenue à une température constante plus ou moins élevée, l'autre extrémité conservât une température égale à la température ambiante. C'est ce qu'il a appelé le *problème de la barre.* Ayant pris pour inconnue l'excès de température θ sur la température ambiante d'une tranche placée à la distance x de la source, il trouva la formule

$$\theta = Ne^{-ax},$$

N étant une constante qui représente l'excès de température à l'origine (c'est-à-dire au point pour lequel $x = 0$), e la base des logarithmes népériens et a un coefficient *qui est constant* pour une même substance.

2° *Problème du mur.* — Cette constante n'est pas le coefficient de conducti-

bilité proprement dit, mais elle est liée à ce coefficient par une relation simple. Fourier trouva cette relation en traitant le *problème du mur*, c'est-à-dire la conductibilité de la chaleur dans un mur, fait de la même substance que la barre, d'une épaisseur finie, et dont les deux faces, parallèles et indéfinies, sont maintenues à des excès de température constants t et t_1.

Il définit alors le *coefficient de conductibilité* la quantité de chaleur qui traverse, dans l'unité de temps, l'unité de surface d'une tranche quelconque du mur, parallèle aux faces.

Soient a' et a les *constantes* de deux barres de substances différentes, K et K' les coefficients de conductibilité correspondants; ces quatre quantités sont liées par la relation $\frac{K}{K'} = \frac{a'^2}{a^2}$, à la condition que les surfaces extérieures des barres aient *même pouvoir émissif*, ou, comme on dit, même *conductibilité extérieure*. On réalise cette condition en les recouvrant d'une mince couche d'un même vernis.

Les expériences de Despretz, puis celles de Wiedemann et Franz, ont permis de mesurer les constantes a et a', et par suite les rapports $\frac{K}{K'}$ avec beaucoup de précision.

688. **Expériences de Despretz.** — 1° *Appareil.* — Dans une

Fig. 642.

barre prismatique on a pratiqué, de décimètre en décimètre, de petites cavités; on les a remplies de mercure et dans chacune d'elles on a plongé la boule d'un petit thermomètre (fig. 642). La barre étant exposée par un bout à une source de chaleur qui lui donne une température constante, on voit les thermomètres *monter* successivement, à partir de la source, à des températures *fixes, qui* sont décroissantes d'un thermomètre au suivant.

Despretz a établi ainsi, pour les métaux bons conducteurs (or,

argent, cuivre), une loi qui se déduit d'ailleurs des formules de Fourier :

Pour des points dont les distances à la source croissent en progression arithmétique, les excès de température décroissent en progression géométrique.

Il a déduit aussi de ses expériences les coefficients de conductibilité relatifs de différentes substances.

Soit, en effet, [1] $t = Ne^{-ax}$ la formule correspondante à la première barre. On en déduit que, aux distances 1, 2, 3..., les excès de température $t_1, t_2, t_3 \ldots$, sont

$$Ne^{-a}, \qquad Ne^{-2a}, \qquad Ne^{-3a} \ldots;$$

on voit donc que les excès successifs forment une progression géométrique dont la raison est e^{-a} : c'est la loi énoncée plus haut.

Soient maintenant t_n et t_{n+1} deux termes consécutifs de la série ; en les divisant membre à membre, on aura l'inverse de la raison e^a : posons $e^a = p$.

Si l'on fait le même calcul pour une deuxième barre, de même conductibilité extérieure, on aura $e^{a'} = p'$.

En passant aux logarithmes vulgaires, on aura

$$a \log e = \log p \qquad \text{et} \qquad a' \log e = \log p',$$

d'où

$$\frac{a'}{a} = \frac{\log p'}{\log p}, \qquad \text{d'où enfin} \qquad \frac{K}{K'} = \frac{a'^2}{a^2} = \left(\frac{\log p'}{\log p}\right)^2.$$

En représentant par 1000 le coefficient de conductibilité de l'or, il a trouvé les nombres suivants :

Platine	981	Fer	374	Plomb	179
Argent	973	Zinc	363	Marbre	23
Cuivre	897	Étain	304	Porcelaine	12

689. **Expériences de Wiedemann et Franz.** — En pratiquant des cavités à la surface des barres, Despretz détruisait partiellement la continuité des métaux. Wiedemann et Franz ont évité cet inconvénient, en mesurant les excès de température à l'aide d'un *élément thermo-électrique*, qu'ils appliquaient successivement aux différents points des barres.

Les barres métalliques étaient aussi régulières que possible, et disposées dans un espace dont la température était constante. Une des extrémités des barres était en communication avec une source de chaleur à température constante.

En opérant ainsi, Wiedemann et Franz ont obtenu des résultats notablement différents de ceux de Despretz.

Argent	1000	Étain	145	Plomb	85
Cuivre	736	Fer	119	Platine	84
Or	532	Acier	116		

où les quantités de chaleur qui traversent deux sections égales des deux murs pendant le même temps, seront égales. On aura par suite

$$Ks\frac{\theta'-\theta}{l}x = K's\frac{\theta'_1-\theta_1}{l_1}x, \quad \text{d'où, si } l=l_1, \quad K'=K\cdot\frac{\theta'-\theta}{\theta'_1-\theta_1}. \qquad [1]$$

Donc, en relevant, à l'aide du couple thermo-électrique, les différences de températures relatives à deux sections des deux murs, séparées par une même distance, on connaîtra

$$\frac{\theta'-\theta}{\theta'_1-\theta_1}.$$

Comme K est connu, l'équation [1] permettra alors de calculer K'.

M. Berget a trouvé, par ce procédé, les valeurs suivantes de K'.

Cuivre.	1,0405	Fer.	0,1587	Antimoine . . .	0,042
Zinc.	0,305	Étain	0,151	Bismuth	0,0201
Laiton.	0,2625	Plomb.	0,0810	Mercure	0,02015

692. **Conductibilité des gaz.** — On ne peut apprécier directement la conductibilité des gaz, à cause de leur grand pouvoir diathermane (709) et de l'extrême mobilité de leurs molécules ; mais lorsqu'ils sont gênés dans leurs mouvements, leur conductibilité paraît *être à peu près nulle*.

Il résulte d'expériences de Magnus que l'hydrogène est le seul gaz auquel on puisse attribuer une conductibilité propre pour la chaleur, comparable à celle des métaux[1].

693. **Convection.** — Il y a lieu de distinguer, pour les liquides et pour les gaz, un deuxième mode de propagation de la chaleur par conductibilité. En effet, la chaleur s'y propage en outre *par un déplacement même des molécules*, réalisé par des courants intérieurs qui sont dus à la dilatation, et, par suite, à la variation de densité des couches immédiatement en contact avec la source de chaleur. On peut mettre en évidence ces courants ascendants, dans un liquide qu'on chauffe par le bas, en y jetant une substance légère et pulvérulente, telle que de la sciure de bois. Les physiciens anglais ont caractérisé ce mode de propagation de la chaleur en l'appelant *convection*, mot qui signifie *transport*. La conductibilité proprement dite étant extrêmement faible pour les liquides et pour les gaz, c'est presque exclusivement par convection que la chaleur se transmet dans leur masse. Et si les substances filamenteuses, telles que la paille, le coton, l'édredon, les fourrures, offrent une grande résistance à la conductibilité, c'est qu'elles suppriment la propagation par convection dans la masse d'air qu'elles emprisonnent et immobilisent en leurs interstices.

1. *Nous verrons plus tard qu'il possède aussi cette conductibilité pour l'électricité.*

CHAPITRE XIV

CHALEUR RAYONNANTE

PROPAGATION DE LA CHALEUR PAR RAYONNEMENT.

694. **Définitions préliminaires.** — *Rayonnement et absorption de la chaleur.* — Lorsqu'un corps est placé dans une enceinte dont la température est plus ou moins élevée que la sienne, on observe toujours que la température du corps s'élève ou s'abaisse progressivement, jusqu'à ce qu'elle ait atteint celle de l'enceinte; d'où l'on conclut que le corps a *gagné* ou *perdu* une certaine quantité de chaleur, *enlevée* ou *cédée* au milieu ambiant. La chaleur se transmet donc d'un corps à un autre à travers l'espace. Ce mode de propagation, qui se produit à toutes les distances et dans toutes les directions, se désigne sous le nom de *rayonnement*; et l'on nomme *absorption* l'inverse de la radiation, c'est-à-dire la pénétration de la chaleur rayonnante dans les corps.

Corps chauds et *corps froids.* — Les corps désignés vulgairement sous le nom de *corps chauds* ne sont pas les seuls qui émettent de la chaleur, et les *corps froids* les seuls qui en absorbent. Tous les corps, chauds ou froids, émettent et absorbent constamment de la chaleur, seulement en quantités inégales.

Chaleur rayonnante ou *radiation calorifique.* — Lorsqu'on considère la chaleur se propageant par rayonnement, on l'appelle *chaleur rayonnante* ou *radiation calorifique.*

Rayon calorifique et *faisceau calorifique.* — Enfin, on définit *rayon de chaleur* ou *rayon calorifique* la ligne suivant laquelle la chaleur se propage, et *faisceau* un ensemble de rayons. Si ceux-ci s'écartent les uns des autres, le faisceau est *divergent*; s'ils sont parallèles, le faisceau est lui-même *parallèle.*

Chaleur lumineuse et *chaleur obscure.* — Dans l'étude de la chaleur rayonnante, il y a lieu de distinguer la *chaleur* ou *radiation obscure* et la *chaleur* ou *radiation lumineuse* : la première est émise par les corps non lumineux, tel qu'un vase rempli d'eau à 100°, et la seconde par les corps lumineux, comme le soleil ou les métaux incandescents.

695. Caractères physiques du rayonnement. — Le rayonnement se distingue nettement de la conductibilité par les caractères suivants :

1° *Le rayonnement a lieu dans toutes les directions autour des corps.* — En effet, si l'on place un thermomètre en différents points autour d'un corps chaud, il subit partout une élévation de température.

2° *Dans un milieu homogène, le rayonnement se fait en ligne droite.* — En effet, si l'on interpose un petit écran sur la droite qui joint une source calorifique au réservoir d'un thermomètre, celui-ci cesse d'être influencé par la source.

Mais en passant d'un milieu dans un autre, de l'air dans le verre par exemple, les rayons calorifiques, de même que les rayons lumineux, changent de direction : on dit également qu'ils sont *réfractés*.

3° *La chaleur rayonnante se propage dans le vide.* — La présence d'un milieu pondérable ne paraît pas nécessaire au rayonnement de la chaleur. En effet, pour la chaleur lumineuse, la propagation dans le vide se trouve démontrée par le rayonnement du soleil à travers les espaces planétaires, et, pour la chaleur obscure, on a constaté le fait par l'expérience de Rumford.

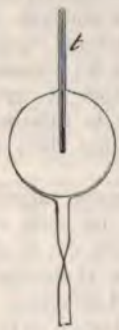


Fig. 645.

Le réservoir d'un thermomètre *t* (fig. 645) était placé au centre d'un ballon, dans le vide barométrique ; dès qu'on l'exposait à une source de chaleur obscure, en le plongeant, par exemple, dans de l'eau chaude, le mercure montait presque instantanément. Donc la chaleur obscure se propage dans le vide, car le verre est trop mauvais conducteur pour que la propagation s'opère aussi rapidement par les parois du ballon et la tige du thermomètre.

4° *Vitesse de propagation de la chaleur rayonnante.* — La vitesse de propagation de la chaleur n'a pas été déterminée : on sait seulement qu'elle doit peu différer de celle de la lumière, si elle ne lui est pas rigoureusement égale.

5° *Identité de la chaleur rayonnante et de la lumière.* — Le caractère essentiel de la chaleur rayonnante, caractère qui résume tous les autres, c'est son identité avec la lumière, vérifiée expérimentalement par l'étude de toutes ses propriétés et des lois qui les régissent.

696. Intensité de la chaleur rayoannnte. — Lois. — On

appelle *intensité* d'une source calorifique *la quantité de chaleur* qu'elle envoie *normalement, à l'unité de distance, sur l'unité de surface* du corps réchauffé.

Trois circonstances peuvent modifier la quantité de chaleur envoyée sur une surface déterminée par une source calorifique d'intensité constante. Ce sont : la distance de la source de chaleur, l'obliquité des rayons calorifiques par rapport à la surface qui les émet, et leur obliquité par rapport à la surface qui les reçoit.

1re Loi. — ***La quantité de chaleur rayonnée normalement sur une surface déterminée varie en raison inverse du carré de la distance de cette surface à la source.***

Cette loi peut se démontrer soit par le raisonnement, exactement comme pour la lumière, soit par l'expérience, à l'aide de l'appareil de Melloni, que nous décrirons ci-dessous.

Elle ne s'applique qu'aux rayons calorifiques *divergents*; pour des rayons *parallèles, la quantité reste la même à toutes les distances*, abstraction faite de l'absorption par les milieux que la chaleur traverse.

2e Loi. — *Loi du cosinus* (ou de Lambert). — ***La quantité de chaleur émise obliquement par une surface rayonnante est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons avec la normale à la surface.***

Cette loi, découverte par le physicien Lambert, n'est pas générale : Desains a constaté qu'elle ne se vérifie que dans le cas très restreint des corps *dénués de pouvoir réflecteur*, comme le noir de fumée (703).

3e Loi. — ***La quantité de chaleur envoyée obliquement sur une surface déterminée par une source constante est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons incidents avec la normale à cette surface.***

Démonstration. — Cette loi peut se démontrer *à priori*.

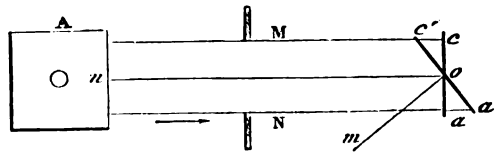


Fig. 646.

En effet, soit une source A d'intensité constante i (fig. 646) et soit d'abord ac la portion de surface qui reçoit normalement le faisceau calorifique incident.

La quantité de chaleur q reçue par l'unité de surface en ac sera $q = \frac{i}{\text{surf. } ac}$. Si l'on incline la surface, la portion $a'c'$, correspondante à ac, recevra la même quantité de chaleur; mais, cette chaleur étant répartie sur une surface plus grande, la quantité reçue par l'unité de surface diminuera nécessairement, et l'on aura $q' = \frac{i}{\text{surf } a'c'}$. De ces deux égalités on déduira deux valeurs pour i,

$$i = q' \times \text{surf } a'c' = q \times \text{surf } ac,$$

d'où l'on déduit

$$q' = q \frac{\text{surf } ac}{\text{surf } a'c'},$$

et, comme surf ac = surf $a'c'$ cos *mon*, il vient $q' = q$ cos *mon*.

Remarque. — On démontrerait la 1re loi par un raisonnement analogue.

697. **Vitesse de refroidissement : Loi de Newton.** — Les conséquences nécessaires du rayonnement calorifique sont, d'une part, le réchauffement des corps extérieurs à la source, d'autre part le refroidissement de la source.

Un corps dans le vide ne se refroidit que par rayonnement. Dans l'atmosphère, il se refroidit en outre par suite de son contact avec l'air; dans les deux cas, on appelle *vitesse moyenne de refroidissement* l'abaissement *de sa température pendant l'unité de temps.*

1° *Refroidissement dans le vide.* — Newton a énoncé sur le refroidissement des corps *dans le vide* la loi suivante : *La vitesse moyenne de refroidissement d'un corps est proportionnelle à l'excès moyen de sa température sur celle de l'enceinte.*

Si l'on appelle θ l'excès initial, θ' l'excès final, x le temps écoulé, m une constante, la loi de Newton s'exprime par l'équation

$$\frac{\theta - \theta'}{x} = m\left(\frac{\theta + \theta'}{2}\right).$$

Le coefficient constant m s'appelle la *constante de refroidissement.*

Dulong et Petit ont démontré expérimentalement que cette loi n'est pas générale et ne peut s'appliquer qu'à des excès de température ne dépassant pas 20° à 30°. Au delà, la vitesse de refroidissement est plus grande que la loi ne l'indique.

Remarque. — *Vitesse de réchauffement.* — Si, au lieu du refroidissement des corps, on considère leur réchauffement, la loi de Newton s'y applique aussi et dans les mêmes limites.

2° *Refroidissement dans les gaz.* — La vitesse de refroidisse-

ment dans les gaz est d'autant plus grande que la différence des températures du milieu ambiant et du corps chaud est plus considérable. Elle est plus grande dans les gaz que dans le vide, et elle varie avec la nature des gaz : elle est plus grande, par exemple, dans l'hydrogène que dans l'air. Enfin elle dépend encore du pouvoir émissif du corps chaud et de la pression de l'atmosphère ambiante.

Conséquence. — Lorsqu'un corps est exposé à une source de chaleur constante, sa température ne saurait s'élever indéfiniment ; car la quantité de chaleur qu'il reçoit dans l'unité de temps est toujours la même, tandis que celle qu'il perd croît en même temps que l'excès de sa température sur celle de l'air ambiant. Il vient donc un moment où *la quantité de chaleur absorbée est égale à celle qui est émise* et la température du corps qui se réchauffe reste alors *stationnaire.*

698. **Équilibre mobile de température** ou **Hypothèse de Prévost.** — Deux hypothèses ont été faites sur la transmission de la chaleur par rayonnement. On a supposé d'abord que, lorsque deux corps, à des températures inégales, sont en présence, il y a seulement rayonnement du corps le plus chaud vers le plus froid, et qu'il n'y a point de rayonnement inverse. Cet état durerait jusqu'à ce que la température du corps le plus chaud, en s'abaissant graduellement, devînt la même que celle de l'autre corps, et alors tout rayonnement cesserait.

Cette hypothèse a été remplacée par la suivante, due à Prévost, de Genève. Tous les corps, quelle que soit leur température, émettent et reçoivent constamment de la chaleur dans toutes les directions. Alors il y a *perte*, c'est-à-dire *refroidissement*, pour ceux dont la température est la plus élevée, parce que les rayons qu'ils émettent sont plus intenses que ceux qu'ils reçoivent. Au contraire, il y a *gain*, c'est-à-dire *échauffement*, pour ceux dont la température est la moins élevée. Il arrive ainsi un moment où la température est la même de part et d'autre ; mais alors l'échange de chaleur entre les corps ne cesse pas, et comme chacun d'eux en reçoit autant qu'il en émet, la température reste partout constante. C'est cet état particulier qu'on désigne sous le nom d'*équilibre mobile de température.*

RÉFLEXION ET DIFFUSION. — POUVOIRS RÉFLECTEUR ET DIFFUSIF. POUVOIRS ABSORBANT ET ÉMISSIF.

699. ***Réflexion*** **de la chaleur rayonnante.** — **Lois.** — Lors-

qu'un faisceau calorifique tombe à la surface d'un corps, une portion plus ou moins grande des rayons est *réfléchie*.

La réflexion de la chaleur rayonnante est soumise aux mêmes lois que la réflexion de la lumière :

1° *Le rayon incident* SI *et le rayon réfléchi* IR (fig. 647) *sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.*

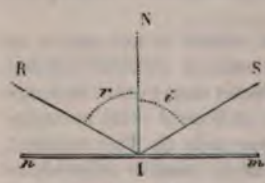


Fig. 647.

2° *L'angle de réflexion* RIN *est égal à l'angle d'incidence* SIN.

Vérification expérimentale. — Ces lois se démontrent soit directement à l'aide du *thermomultiplicateur* de Melloni, soit indirectement par toutes les conséquences géométriques qu'on en déduit, entre autres par l'expérience des *miroirs ardents.*

1° *Expériences de Melloni.* — *Appareil.* — Sur une règle horizontale métallique MN (fig. 648), d'un mètre de longueur et

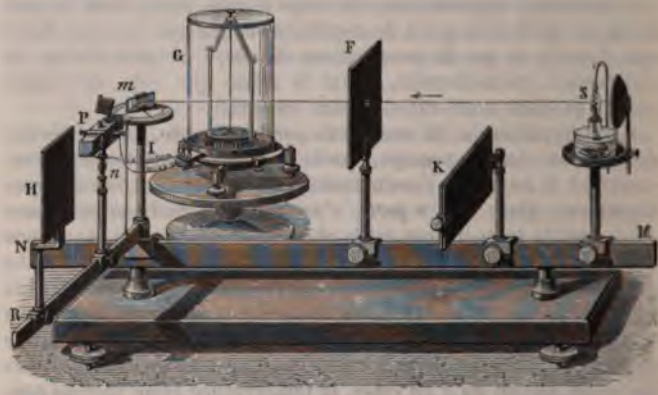


Fig. 648.

divisée en millimètres, et solidement établie sur une table à vis calantes, sont fixées différentes pièces à l'aide de vis de pression : c'est ce qu'on appelle le *banc de chaleur rayonnante.* En S est une source de chaleur, qui est soit un fil de platine chauffé à *blanc* dans la flamme d'une lampe à alcool, appelé *platine incandescent,* soit un cube de laiton plein d'eau à 100°, appelé *cube*

de Leslie (fig. 650). En K, un écran plein intercepte, quand il est relevé, les rayons de chaleur venant de la source; en F, un deuxième écran, percé en son centre, est destiné à laisser passer un faisceau parallèle. A l'autre extrémité de la règle est une tige I, qui soutient un limbe gradué dont le zéro correspond à la direction de la règle MN, et, par suite, du faisceau S*m*. Le limbe est percé à son centre d'un trou dans lequel tourne un axe qui porte un miroir métallique plan *m*. Autour de la tige I tourne librement une alidade L, sur laquelle est fixé le thermomultiplicateur proprement dit, constitué par une pile thermo-électrique P en communication avec son galvanomètre G. Entre la pile et le limbe gradué est une tige *n*, recourbée, à son extrémité, vers le bord du limbe gradué, pour marquer sur celui-ci les déplacements angulaires de l'alidade. Enfin, un écran coudé H[1], porté par l'alidade, se place entre la source de chaleur et la pile, afin que celle-ci puisse ne recevoir que la chaleur réfléchie par le miroir.

Expérience. — On abaisse l'écran K (fig. 648) : un faisceau de chaleur passe par le trou de l'écran F, tombe sur le miroir *m* et s'y réfléchit. Si l'alidade n'est pas dans la direction du faisceau réfléchi, celui-ci ne rencontre pas la pile, et le galvanomètre reste au zéro; mais si l'on tourne lentement l'alidade, on trouve une position *où le galvanomètre marque une déviation maximum*, ce qui a lieu quand la pile reçoit en plein le faisceau réfléchi. Or, si l'on note alors la position, sur le limbe gradué, d'une petite aiguille qui est parallèle à la normale au point d'incidence, on observe qu'*elle partage en deux parties égales l'angle formé par le faisceau incident et le faisceau réfléchi*, ce qui démontre la seconde loi.

La première loi est démontrée par la même expérience; car les pièces de l'appareil sont disposées de manière que les rayons incidents et réfléchis soient dans un même plan qui est horizontal et, par suite, perpendiculaire à la face verticale du miroir.

2° *Expérience des miroirs ardents.* — Cette expérience fut faite pour la première fois, à Genève, par Pictet et Saussure; elle est connue sous le nom d'*expérience des miroirs conjugués* ou des *miroirs ardents*. Elle montre l'existence des foyers *calorifiques* des miroirs concaves et démontre par conséquent que les lois de la réflexion de la chaleur sont identiques à celles de la lumière.

Deux réflecteurs M et N (fig. 649) sont disposés à 4 ou 5 mètres de distance, de manière que leurs axes coïncident. Au foyer de l'un on place une source calorifique de *très petites dimensions*; (elle n'est, en général, que fort grossièrement réalisée par un

1. Dans le dessin, afin de ne pas masquer la pile, on n'a pas mis l'écran à la place qu'il doit occuper.

petit panier de fil de fer A où l'on met des charbons incandescents); au foyer de l'autre, un corps inflammable B, de l'amadou par exemple. Les rayons émis par la source A se réfléchissent une première fois sur le miroir M, parallèlement à l'axe; ils reviennent se réfléchir une seconde fois sur l'autre réflecteur et concourir en son foyer B. Ce qui le prouve, c'est que le morceau d'amadou placé en ce point prend feu, tandis qu'en deçà et au delà du foyer il ne s'enflamme pas.

700. **Miroirs ardents.** — En raison de la haute température qu'on peut obtenir aux foyers des miroirs concaves, on leur a donné le nom de *miroirs ardents*. On rapporte qu'Archimède incendia les vaisseaux romains devant Syracuse au moyen de semblables miroirs.

Buffon construisit des miroirs ardents dont la puissance prouvait la possibilité du fait attribué à Archimède. Ces miroirs étaient formés par l'assemblage d'un

Fig. 649.

grand nombre de glaces planes et étamées, longues de 22 centimètres sur 16 de large. Elles pouvaient être tournées indépendamment l'une de l'autre dans telle ou telle direction, de manière que les rayons réfléchis sur chacune d'elles vinssent concourir en un même point. Avec un système de 128 glaces, par un ardent soleil d'été, Buffon enflamma ainsi une planche de bois goudronnée, à 68 mètres de distance.

En recevant les rayons solaires sur un miroir de laiton écroui, de 1 mètre de hauteur et d'un rayon de courbure de 2 mètres, on obtient au foyer une

chaleur tellement intense, que des métaux tels que le cuivre, l'argent, y fondent en quelques minutes.

701. **Réflexion apparente du froid.** — Si l'on dispose deux réflecteurs en regard l'un de l'autre (fig. 649), et qu'au lieu de charbons incandescents on place au foyer du miroir M une masse de glace ou un mélange réfrigérant, l'air ambiant étant à 12 ou 15°, un thermomètre placé au foyer de l'autre réflecteur s'abaisse de plusieurs degrés au-dessous de cette température.

Ce phénomène était attribué jadis à des rayons frigorifiques émis par la glace et réfléchis par les miroirs. Mais cette *réflexion apparente du froid*, comme on l'appelait, s'explique naturellement par l'hypothèse de l'équilibre mobile de température.

C'est ainsi qu'il faut expliquer le froid qu'on ressent près des murailles de plâtre, de pierre, et de toute masse dont la température est inférieure à celle de notre corps.

702. **Réflexion irrégulière, ou Diffusion de la chaleur rayonnante.** — Comme dans le cas de la lumière, la *réflexion régulière* (qu'on pourrait également appeler *réflexion spéculaire*) est accompagnée de *réflexion irrégulière* ou *diffusion*.

La réflexion régulière se produit sur les surfaces polies ; la réflexion irrégulière sur les surfaces rugueuses, telles que les plaques dépolies de verre ou de métal.

La diffusion de la chaleur a été étudiée par Melloni au moyen du thermomultiplicateur. On reçoit, sur une surface métallique mate ou recouverte de blanc de céruse, un faisceau de chaleur; or, sous quelque inclinaison ou de quelque côté qu'on dirige la pile du thermomultiplicateur vers le point d'incidence, l'aiguille du galvanomètre est plus ou moins déviée dès que les rayons calorifiques rencontrent la surface réfléchissante : ce qui fait voir qu'il y a de la chaleur réfléchie dans toutes les directions et sous toutes les inclinaisons.

703. **Pouvoir réflecteur.** — I. *Définitions.* — Le *pouvoir réflecteur* d'une substance est sa propriété de réfléchir une proportion plus ou moins grande de la chaleur incidente.

On *mesure* le pouvoir réflecteur par *le rapport de la quantité de chaleur réfléchie à la quantité de chaleur incidente.* C'est à ce rapport qu'on donne proprement le nom de *pouvoir réflecteur absolu.*

II. *Détermination expérimentale.* — 1° *Expériences de Leslie.* — Leslie appelait *pouvoir réfléchissant* le rapport entre la quantité de chaleur réfléchie par un corps et celle que réfléchit un autre corps-type, lequel était ordinairement le cuivre jaune *poli. Il avait déterminé* expérimentalement le pouvoir réfléchissant *de plusieurs substances.* Par exemple, en représentant par 100 le pou-

voir du cuivre jaune poli, il avait trouvé 90 pour l'argent, 70 pour l'acier, 10 pour le verre, et 0 pour le noir de fumée.

2° *Expériences de Melloni.* — Melloni le premier a déterminé, à l'aide du thermomultiplicateur, le *pouvoir réflecteur absolu* d'un certain nombre de substances. Desains a repris ces mesures en perfectionnant les procédés.

3° *Expériences de Paul Desains.* — L'appareil de Melloni était disposé comme l'indique la figure 648. Après avoir enlevé la plaque *m*, on tournait l'alidade R jusqu'à ce qu'elle fût dans le prolongement de la règle MN : la pile recevant directement la chaleur de la source, l'aiguille du galvanomètre marquait, par exemple, 18 degrés. Puis l'on mettait sur le limbe gradué une plaque *m*, bien polie, du métal dont on cherchait le pouvoir réflecteur et l'on tournait l'alidade jusqu'à ce que la pile reçût la chaleur réfléchie par la plaque : le galvanomètre marquait alors une déviation moindre, par exemple 15 degrés. Par conséquent le pouvoir absolu de la plaque était, par définition, égal à $\frac{15}{18}$.

Résultats. — Desains a trouvé ainsi les pouvoirs *absolus* suivants, *pour une incidence de* 30 *degrés* :

Plaqué d'argent.	0,97	Acier.	0,82
Or.	0,95	Zinc..	0,81
Laiton et cuivre rouge. . .	0,93	Fer.	0,77
Platine.	0,83	Fonte de fer..	0,74

704. **Pouvoir diffusif.** — On appelle *pouvoir diffusif absolu* d'une substance (pour la chaleur) le rapport de la quantité totale de chaleur diffusée dans toutes les directions à la quantité de chaleur incidente.

Le pouvoir diffusif dépend de la *source de chaleur* et de la *surface réfléchissante*. Avec le noir de fumée, les métaux et le verre polis, il est très faible et peut être négligé. Avec les métaux mats, le verre dépoli, le papier, le blanc de céruse, le pouvoir diffusif est plus ou moins grand, suivant la source de chaleur.

705. **Pouvoir absorbant.** — I. *Définitions.* — Les corps ont la propriété de laisser pénétrer dans leur masse une portion plus ou moins grande de la chaleur incidente : on exprime cette propriété en disant qu'ils possèdent un *pouvoir absorbant* pour la chaleur. On mesure soit les pouvoirs absorbants *absolus*, soit les pouvoirs absorbants *relatifs*.

Le *pouvoir absorbant relatif* est le rapport de la quantité de chaleur absorbée par un corps à celle qu'absorberait, dans les mêmes conditions, un autre corps pris pour terme de comparaison. Le *pouvoir absorbant absolu* est le rapport de la chaleur absorbée à la chaleur incidente.

Expériences de Melloni. — Melloni a déterminé les *pouvoirs absorbants par rapport au noir de fumée* au moyen de son thermomultiplicateur. Il fixait devant la pile des plaques de cuivre minces : la face qui regardait la pile était recouverte de noir de fumée, tandis que la face exposée à la source de chaleur (cube à 100°) était recouverte de la substance à étudier. La chaleur incidente était différemment absorbée, suivant la nature de l'enduit, et les plaques de cuivre rayonnaient inégalement vers la pile; le galvanomètre marquait alors des déviations différentes, d'où l'on déduisait les pouvoirs absorbants. Voici quelques-uns de ses résultats :

Noir de fumée.	100	Encre de Chine.	85
Blanc de céruse	100	Gomme laque.	72
Colle de poisson.	91	Métaux.	13

II. *Pouvoirs absorbants absolus.* — Toutes ces expériences prouvent que plus un corps réfléchit la chaleur, moins il l'absorbe, et réciproquement. Mais les deux pouvoirs ne sont pas exactement complémentaires, parce que la chaleur incidente se divise réellement en trois portions : 1° l'une qui est absorbée et échauffe le corps; 2° une autre qui est réfléchie régulièrement; 3° une troisième qui est réfléchie irrégulièrement. De plus, pour un certain nombre de corps, il y a à considérer une quatrième portion qui les traverse sans les échauffer (709).

Représentons par l'unité l'intensité du faisceau calorifique incident, par a le pouvoir absorbant absolu d'un corps, par r son pouvoir réflecteur absolu, par d son pouvoir diffusif absolu; on a évidemment, pour les corps qui ne se laissent pas traverser par la chaleur, $a + r + d = 1$ [1].

Pour les métaux polis, dont le pouvoir diffusif est très faible, l'égalité ci-dessus se réduit à $a = 1 - r$ [2].

Pour les substances comme les métaux mats, le papier, dont le pouvoir réfléchissant est très petit, elle devient $a = 1 - d$ [3].

Enfin, quand le pouvoir réfléchissant et le pouvoir diffusif sont en même temps négligeables, on a sensiblement $a = 1$; c'est ce qui a lieu pour le noir de fumée.

706. **Pouvoir émissif.** — 1° *Définitions.* — Le *pouvoir émissif* des corps est leur propriété d'émettre, à température et à surface égales, des quantités de chaleur plus ou moins grandes. On ne considère que les *pouvoirs émissifs relatifs* : on appelle *pouvoir émissif relatif* d'une substance le rapport qui existe entre la quantité de chaleur qu'elle émet, dans certaines conditions de température, de surface et de milieu, à la quantité de chaleur qu'émettrait, dans les mêmes conditions, une autre substance prise pour type de comparaison.

La substance-type, universellement adoptée, est le *noir de fumée.*

2° *Expériences de Melloni.* — Melloni a déterminé les pouvoirs *émissifs en prenant* également pour source de chaleur le cube de

Leslie (fig. 650) : l'une des faces était recouverte de noir de fumée, et les autres de différentes substances. Il dirigeait successivement sur la pile les rayons émis par ces différentes faces et notait les déviations correspondantes du galvanomètre. De la comparaison de ces nombres il a déduit les pouvoirs émissifs suivants :

Noir de fumée.	100	Encre de Chine.	85
Blanc de céruse	100	Gomme laque.	72
Colle de poisson.	91	Surfaces métalliques. . . .	12

3° *Expériences de Desains.* — Paul Desains, qui a repris ces

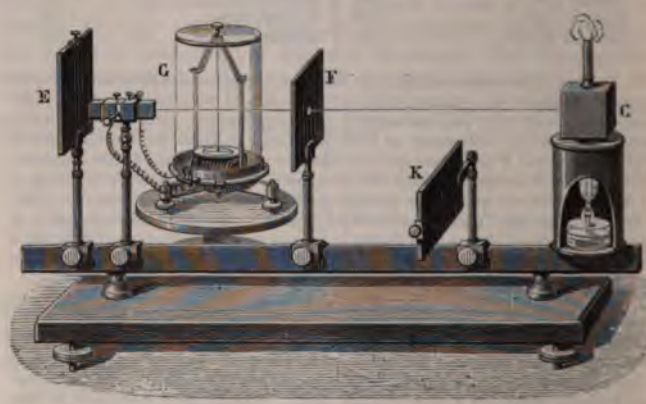


Fig. 650.

expériences en se servant du thermomultiplicateur, a trouvé les nombres suivants pour les métaux, le pouvoir du noir de fumée étant représenté par 100 :

Platine laminé.	10,50	Or en feuilles	4,28
— bruni.	9,50	Argent vierge laminé. . .	3,00
Argent mat déposé chimiquement.	5,36	— pur bruni.	2,50
Cuivre en lames.	4,95	— déposé chimiquement et bruni..	2,25

707. Comparaison des pouvoirs absorbants et des pouvoirs émissifs. — 1° *Loi de Leslie.* — *Expérience de Ritchie.* — Leslie avait conclu de ses expériences *que le pouvoir émissif d'un corps*, relatif au noir de fumée, *est toujours égal à son pouvoir absorbant* relatif, c'est-à-dire que, si une substance émet 2 fois,

3 fois plus de chaleur que le noir de fumée, elle en absorbe aussi 2 fois, 3 fois davantage.

Cette loi a été longtemps admise comme générale; mais Kirchhoff a trouvé que les pouvoirs émissif et absorbant d'une même substance ne varient pas dans le même rapport quand la température s'élève ou quand la source de chaleur change.

La loi de Leslie se vérifie (avec ces restrictions) par l'expérience suivante, due à Ritchie.

L'appareil est une sorte de thermomètre différentiel, constitué par deux réservoirs cylindriques B et C de métal, et pleins d'air (fig. 651), réunis par un tube à deux branches contenant de l'eau. Entre eux se trouve un troisième réservoir A, plus grand, de même forme, qu'on peut remplir d'eau chaude par une tubulure ; de plus, A est mobile et peut être rapproché plus ou moins de B ou de C. Enfin, les bases de ces trois cylindres, qui sont en regard, sont alternativement recouvertes d'un plaqué d'argent et de noir de fumée, de manière que les deux faces en présence soient l'une argentée et l'autre noircie. Par suite, la face argentée de A rayonne vers la face noire de B, et la face noire de A vers la face argentée de C. Le réservoir A étant rempli d'eau chaude, on remarque que, lorsqu'il est placé à égale distance de B et de C, la colonne liquide *reste stationnaire et à la même hauteur* dans les deux branches, ce qui prouve que les réservoirs B et C absorbent la même quantité de chaleur.

Fig 651.

Or, si l'on représente par a et e les pouvoirs absorbant et émissif absolus du noir de fumée, par a' et e' ceux de l'argent, la quantité de chaleur absorbée par B, étant en même temps proportionnelle à a et à e', peut être représentée par $a \times e'$; de même la chaleur absorbée par C est représentée par $a' \times e$. On peut donc poser

$$a \times e' = a' \times e, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{a}{a'} = \frac{e}{e'},$$

égalité qui exprime d'une manière générale que *les pouvoirs absorbants absolus sont proportionnels aux pouvoirs émissifs absolus.*

Il est à remarquer que les deux conditions restrictives de la loi de Leslie sont satisfaites dans l'expérience de Ritchie.

En général, toutes les causes *qui modifient* le pouvoir émissif *modifient dans le même sens* le pouvoir absorbant.

708. Applications. — La propriété que possèdent les corps d'absorber, de réfléchir ou d'émettre plus ou moins de chaleur dans les mêmes circonstances, a de nombreuses applications dans *l'économie domestique* et dans les arts.

Usages domestiques. — Par exemple, pour les vases où l'on fait chauffer des liquides, tels que les cafetières, il y aurait avantage à ce que la surface fût noire et dépolie, puisque alors le pouvoir absorbant serait plus grand. Le poli qu'on lui donne habituellement diminue donc l'absorption et accroît la dépense de combustible. S'il s'agit, au contraire, de maintenir longtemps un liquide à une température élevée, il faut le placer dans un vase de métal poli et brillant, comme les théières d'argent; car alors, le pouvoir émissif étant moindre, le refroidissement sera plus lent.

709. **Pouvoirs diathermanes.** — I. *Définitions.* — *Diathermanéité.* — Plusieurs corps laissent passer la chaleur à travers leur masse, de même que les corps transparents laissent passer la lumière : tels sont l'air, le sel gemme, le verre. D'autres substances, comme les métaux, sont imperméables à la chaleur. Melloni a appelé *substances diathermanes* les premières et *substances athermanes* les dernières. La propriété elle-même s'appelle *diathermanéité :* elle correspond à la *transparence* pour la lumière.

Pouvoir diathermane. — On appelle *pouvoir diathermane* d'une substance *le rapport* de la quantité de chaleur qu'elle *laisse passer* à celle qu'elle *reçoit.*

II. *Détermination.* — *Expériences de Melloni.* — Melloni a déterminé les pouvoirs diathermanes à l'aide de son thermomultiplicateur. Il employait cinq sources de chaleur *à températures différentes* :

Fig. 652.

Fig. 653.

1° La *lampe de Locatelli*, lampe sans verre, avec réflecteur, et à un seul courant d'air (fig. 652);

2° La *lampe d'Argand*, lampe à double courant d'air et munie d'un verre;

3° Le *platine incandescent*, fil de platine contourné en hélice et maintenu au rouge blanc dans la flamme d'une lampe à alcool (fig. 648);

4° Le *cuivre* à 400°, plaque de cuivre, noircie extérieurement et chauffée à 400° environ par la flamme d'une lampe à alcool (fig. 653);

5° Le *cube de Leslie*, cube de cuivre rouge, noirci à l'extérieur et rempli d'eau à 100° (fig. 650).

Les trois premières sources donnent de la *chaleur lumineuse*, et les deux dernières de la *chaleur obscure*.

Le thermomultiplicateur était disposé comme le montre la figure 654. Les substances sur lesquelles on expérimentait étaient taillées en plaques d'une épaisseur variable, et fixées en *o* sur un

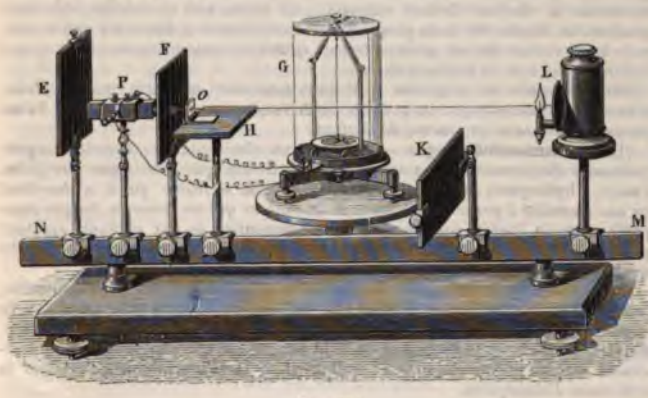


Fig. 654.

support H. Après les avoir traversées, les rayons calorifiques rencontraient la pile P, et imprimaient à l'aiguille du galvanomètre une déviation qui mesurait la chaleur transmise. En comparant cette déviation à celle qu'on obtient directement quand la plaque est enlevée, on calcule le pouvoir diathermane de celle-ci.

710. Résultats relatifs aux pouvoirs diathermanes. — *Influence de la nature de la source et de la substance de l'écran.* — Les pouvoirs diathermanes dépendent non seulement de la nature de la substance, mais encore de celle de la source. Cela résulte nettement du tableau suivant.

SUBSTANCES	LAMPE de Locatelli	PLATINE incandescent	CUIVRE chauffé à 400°	CUIVRE chauffé à 100°
Sel gemme	92	92	92	92
Spath d'Islande	39	28	6	0
Verre à glaces	39	24	6	0
Cristal de roche	37	18	6	0
Chaux sulfatée	14	5	0	0
Alun	9	2	0	0
Glace pure	6	0	0	0

Influence de l'épaisseur de l'écran. — L'expérience fait voir que *la quantité de chaleur qui traverse un écran décroît quand son épaisseur augmente*; mais l'absorption n'est pas *proportionnelle* à l'épaisseur, car c'est surtout dans les premières couches qu'elle se produit.

Diathermanéité du sel gemme. — Le tableau ci-dessus montre que la chaleur lumineuse est plus transmissible que la chaleur obscure, sauf pour le sel gemme, dont le pouvoir diathermane reste constant et égal à 92, quelle que soit la source de chaleur. Melloni admettait, en outre, que ce nombre est indépendant de l'épaisseur de la plaque; mais Paul Desains a démontré que le pouvoir diathermane du sel gemme *décroît* quand l'épaisseur *augmente* et quand la température de la source *s'abaisse*.

Diathermanéité de la sylvine. — Magnus a constaté, en outre, que la *sylvine* (chlorure de potassium) a un pouvoir diathermane *au moins égal à celui du sel gemme pour toutes les sources de chaleur*.

711. **Diathermanéité des gaz.** — Melloni avait admis que *les gaz sont tous parfaitement diathermanes*; mais M. Tyndall a trouvé que, tandis que l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, ont un pouvoir diathermane *si faible qu'ils n'absorbent qu'une quantité à peine appréciable de la chaleur qui les traverse*, les gaz composés, comme l'acide sulfureux, le gaz ammoniac, le gaz oléfiant, arrêtent presque complètement la chaleur, même lorsque leur tension n'est que de quelques centimètres de mercure.

Diathermanéité de l'air. — M. Tyndall, ayant expérimenté sur de l'air humide, trouva qu'il absorbe 70 fois plus de chaleur que l'air sec; d'où il avait conclu naturellement que l'air humide a un pouvoir absorbant plus grand que l'air sec. Mais les expériences de Magnus et de Wild ont prouvé que c'est *à la vapeur condensée sur les parois du tube* et nullement à la vapeur d'eau qu'est due la différence d'absorption.

712. **Conséquences et applications des pouvoirs diathermanes.** — 1° C'est grâce à leur grand pouvoir diathermane que les couches supérieures de l'atmosphère sont toujours à une basse température, malgré les rayons solaires qui les traversent.

2° L'eau étant peu diathermane, le phénomène inverse se produit au sein des mers et des lacs : les couches supérieures participent aux variations de température, suivant les saisons, tandis qu'à une certaine profondeur la température reste constante.

3° Les propriétés des corps diathermanes ont été utilisées pour séparer la lumière et la chaleur qui rayonnent ensemble d'une même source. Le sel gemme, recouvert de noir de fumée, arrête complètement la lumière et laisse passer la chaleur obscure. Au contraire, des lames ou des dissolutions d'alun arrêtent la chaleur tout en étant parfaitement transparentes. On s'en sert avec avantage dans les éclairages à la lumière électrique ou solaire, lorsqu'il est nécessaire d'éviter une chaleur trop intense. L'iode, dissous dans le bisulfure de carbone, produit l'effet inverse : il absorbe les rayons lumineux, et laisse passer la chaleur obscure.

4° L'usage des cloches en verre dont on abrite dans les jardins certaines plantes, et l'emploi des serres froides ou chaudes sont fondés sur la diathermanéité du verre. On a vu dans le tableau

ci-dessus que cette substance (qui est *diathermane* pour la chaleur lumineuse des rayons solaires) est absolument *athermane* pour la chaleur obscure qui rayonne du sol.

713. **Analyse des radiations calorifiques. — Thermochrose.** — De même que Newton avait démontré l'existence de plusieurs espèces de lumière, le *rouge*, l'*orangé*, le *jaune*, le *vert*, le *bleu*, l'*indigo* et le *violet*, de même Melloni démontra l'existence de plusieurs espèces de rayons calorifiques, émis simultanément, en proportions variables, par les diverses sources de chaleur et doués de la propriété de traverser plus ou moins facilement les substances diathermanes. Celles-ci possèdent donc une véritable *coloration* calorifique, c'est-à-dire qu'elles absorbent certains rayons de chaleur et laissent passer les autres, de la même manière qu'un verre bleu, par exemple, est traversé par la lumière bleue, et ne l'est pas par les autres couleurs. Melloni a donné le nom de *thermochrose* à cette espèce de *coloration calorifique* des corps diathermanes.

CHAPITRE XV

APPLICATION DES LOIS DE LA CHALEUR. — CHAUFFAGE ET VENTILATION.

714. **Différentes sortes de chauffage.** — Le *chauffage* a pour objet d'utiliser, dans l'économie domestique et dans l'industrie, les sources de chaleur que nous offre la nature.

Celles qui sont principalement en usage jusqu'à nos jours se trouvent dans la combustion du bois, du charbon, de la houille, du coke, de la tourbe et de l'anthracite. Depuis quelques années on utilise aussi le gaz d'éclairage, les huiles de pétrole et même l'électricité.

D'après les appareils qui servent à la combustion, on peut distinguer cinq systèmes de chauffage : 1° chauffage à foyer extérieur (*cheminées*) ; 2° chauffage à foyer intérieur (*poêles*) ; 3° chauffage par l'air chaud (*calorifères à air*) ; 4° chauffage par la vapeur (*calorifères à vapeur*) ; 5° chauffage par la circulation d'eau chaude (*calorifères à eau*).

715. **Cheminées.** — *Description.* — On sait que les cheminées sont des foyers ouverts, adossés à un mur et surmontés d'un tuyau par lequel se dégagent les produits de la combustion.

Historique. — Leur invention paraît dater du premier siècle de l'ère chrétienne. Dans les temps plus reculés, le foyer était placé au milieu de la pièce à chauffer, et la fumée s'échappait par une ouverture pratiquée sur le comble des habitations. Les premières cheminées, quoique placées contre les murs,

n'étaient pas entourées de chambranles, mais seulement surmontées d'une hotte par laquelle se dégageait la fumée. Ce n'est que dans les temps modernes qu'on a donné aux cheminées la forme qu'elles ont aujourd'hui. Ce sont des physiciens qui les ont successivement perfectionnées, et particulièrement Philibert Delorme, Gauger, Franklin, Montgolfier et Rumford.

Avantages et inconvénients. — Quelques perfectionnements qu'on ait apportés à la construction des cheminées, elles sont encore le mode de chauffage le plus imparfait, au point de vue économique; car elles n'utilisent, avec le bois, que 6 pour 100 de la chaleur totale dégagée par le combustible, et 15 pour 100 avec le coke et la houille : cela provient de ce que le courant d'air nécessaire à la combustion entraine toujours à l'extérieur une portion considérable de la chaleur produite. C'est ce qui avait fait dire à Franklin que, si l'on voulait, pour une quantité de combustible donnée, obtenir *le moins de chaleur possible*, il faudrait adopter les cheminées. Néanmoins elles sont le mode de chauffage le plus agréable et le plus sain, à cause de la présence du feu et du renouvellement continu qu'elles entretiennent par leur *tirage* dans l'air des appartements.

716. **Tirage des cheminées.** — On entend par *tirage* d'une cheminée un courant de bas en haut qui s'établit dans le tuyau par l'effet de l'ascension des produits de la combustion; quand le courant est rapide et continu, on dit que la cheminée *tire* bien.

Fig. 655.

Le tirage est dû à la différence des températures à l'intérieur et à l'extérieur du tuyau. Les gaz qui le remplissent étant moins denses que l'air de l'appartement, l'équilibre est impossible. En effet, le poids de la colonne gazeuse CD (fig. 655) du tuyau étant moindre que celui de la colonne d'air extérieure AB, de même hauteur, il en résulte, de l'extérieur vers l'intérieur de la cheminée, un excès de pression qui expulse les produits de la combustion : ce mouvement est d'autant plus rapide que la différence de poids entre les deux masses gazeuses est plus grande.

On constate très bien l'existence des courants que font naître

dans les gaz les différences de température, au moyen de l'expérience suivante : On ouvre une porte mettant en communication une pièce chauffée avec une autre pièce qui ne l'est pas, puis on tient, vers le haut de la porte, une bougie allumée ; on voit alors la flamme se diriger de la pièce chaude vers la pièce froide. Au contraire, si l'on pose la bougie sur le sol, la flamme se dirige de la pièce froide vers la pièce chaude. Ces deux effets sont dus à un courant d'air chaud qui s'échappe par le haut de la porte, tandis que l'air froid et plus dense qui vient le remplacer arrive par le bas.

Conditions d'un bon tirage. — Les conditions d'un bon tirage pour une cheminée sont les suivantes :

1° La section du tuyau ne doit avoir que la superficie strictement nécessaire pour l'écoulement des produits de la combustion ; autrement, si cette section est trop grande, il peut s'établir à la fois des courants ascendants et des courants descendants, et la cheminée *fume*.

Il est bon de placer au sommet du tuyau une *buse* (ou ajutage) conique plus étroite que lui, afin que la fumée sorte avec une vitesse suffisante pour résister à l'action du vent.

2° Le tuyau de la cheminée doit être suffisamment élevé ; car l'excès de la pression extérieure sera d'autant plus grand que la colonne d'air échauffé sera plus haute.

3° L'air extérieur doit pouvoir pénétrer dans l'appartement assez rapidement pour répondre à l'appel du foyer. Dans un appartement hermétiquement clos, la combustion ne pourrait se prolonger, ou bien il s'établirait des courants d'air descendants qui rabattraient la fumée. Il faut donc que l'air entre en quantité suffisante par les joints des portes et des croisées.

4° On doit éviter de faire communiquer entre eux deux tuyaux de cheminée ; car si l'un tire plus que l'autre, il peut se produire un courant d'air descendant qui ramène la fumée.

717. **Poêles.** — Les *poêles* sont des appareils de chauffage à foyer isolé, placés au milieu même de la masse d'air qu'on veut chauffer, en sorte que la chaleur rayonne dans toutes les directions autour du foyer. A la partie inférieure est la prise d'air nécessaire à la combustion, dont les produits se dégagent à la partie supérieure par des tuyaux de tôle plus ou moins longs.

Avantages et inconvénients. — Les produits gazeux n'arrivant ainsi au dehors que très refroidis, on parvient à utiliser la presque totalité de la chaleur développée : aussi ce mode de chauffage est-il plus économique ; mais il est loin d'être aussi salubre que les cheminées, car il ne donne qu'une ventilation très faible : elle

est même nulle quand la prise d'air se fait à l'extérieur, comme cela a lieu dans les poêles suédois. Les poêles ont, en outre, l'inconvénient de répandre une odeur désagréable et des émanations délétères, surtout lorsqu'ils sont de fonte ou de tôle. Cela peut être attribué à la décomposition des matières organiques de l'air par leur contact avec les parois chaudes des tuyaux, et aussi aux gaz du foyer, pour lesquels la fonte devient perméable à une température élevée.

Poêles à combustion lente, genre Choubersky, etc. — Tous ces inconvénients ont été singulièrement aggravés dans les poêles *à combustion lente*, dont l'usage s'est répandu depuis quelques années. Tout ce que nous pouvons dire de plus favorable sur ce mode de chauffage, c'est que le meilleur des types ne vaut rien; — au point de vue hygiénique, s'entend, — car au point de vue de l'économie du combustible ils présentent un avantage sérieux sur tous les modes de chauffage à combustion vive. On a caractérisé, non sans raison, cette invention moderne, en disant qu'elle réalise l'*intoxication à domicile lente* et *à bon marché*.

718. **Chauffage à la vapeur.** — La propriété qu'ont les vapeurs, de restituer leur chaleur de vaporisation lorsqu'elles se condensent, a été utilisée pour le chauffage des bains, des ateliers, des édifices publics, des serres, des étuves. Pour cela, on produit la vapeur dans des chaudières analogues à celles des machines à vapeur; puis on la fait circuler dans des tuyaux placés dans le lieu qu'il s'agit de chauffer. La vapeur se condense dans ces tuyaux et leur cède toute sa chaleur de vaporisation au moment de la condensation. Cette chaleur se transmet ensuite à l'air extérieur ou au liquide dans lequel sont placés les tuyaux de conduite.

719. **Chauffage par l'air chaud.** — *Calorifères à air.* — Le chauffage par l'air chaud consiste à chauffer de l'air dans la partie inférieure d'un édifice, et à le laisser ensuite s'élever jusqu'aux étages supérieurs, en vertu de sa moindre densité, par des tuyaux de conduite placés dans les murs.

Description du calorifère. — L'appareil est disposé comme le montre la figure 656. Un fourneau F, établi dans les caves, contient, à la suite les uns des autres, un système de tubes recourbés AB, dont un seul est visible dans le dessin. C'est par l'orifice inférieur A, appelé la *prise d'air*, que l'air extérieur pénètre dans les tubes; là il s'échauffe, et, s'élevant dans le sens des flèches, pénètre dans les appartements M par l'orifice supérieur B, qu'on nomme *bouche de chaleur*. Dans les différents étages, chaque pièce a ainsi une ou plusieurs *bouches de* chaleur, qu'il faut placer le plus bas possible, l'air chaud tendant *toujours à* monter.

Le conduit O est un tuyau de cheminée ordinaire par lequel se dégagent du *fourneau* les produits de la combustion.

Avantages et inconvénients. — Les *calorifères à air* sont beaucoup plus économiques que les cheminées; mais, comme ils ne peuvent ventiler aussi bien les appartements, on doit avoir soin

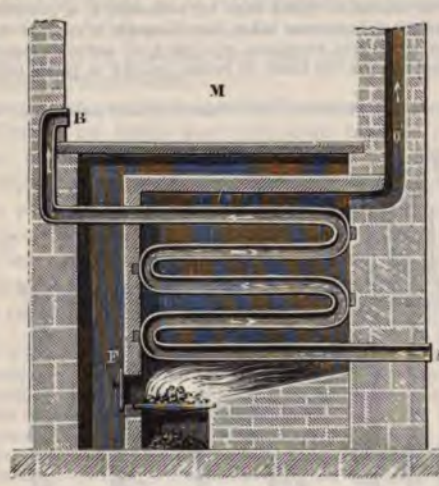


Fig. 656.

de placer en haut de ceux-ci des bouches de départ pour donner dégagement à l'air vicié.

720. **Chauffage par circulation d'eau chaude.** — *Calorifères à eau.* — Le chauffage par circulation d'eau chaude consiste en un mouvement circulatoire continu d'eau qui, après s'être échauffée dans une chaudière, s'élève dans une série de tubes, puis, après s'être refroidie, revient à la chaudière par une série semblable.

Description du calorifère. — Le premier appareil propre à ce genre de chauffage fut inventé par Bonnemain, en France, vers la fin du siècle dernier. La figure 657 représente un dispositif déjà ancien, dû à M. Léon Duvoir : c'est un schéma très clair de calorifère à eau chaude pouvant servir pour un édifice de plusieurs étages.

L'appareil de chauffage, installé dans les caves, consiste en une chaudière *oo*, en forme de cloche et à foyer intérieur F. A la partie supérieure de la chaudière est fixé un long tube M, qui se rend à un réservoir Q, placé dans les combles de l'édifice qu'on veut chauffer. Ce réservoir porte, à sa partie supérieure, une tubulure *n* fermée par une soupape *s* qu'on charge plus ou moins, de manière à limiter la tension de la vapeur dans l'intérieur de l'appareil.

La chaudière et le tube M étant remplis d'eau, ainsi qu'une partie du réser-

voir Q, à mesure que l'eau s'échauffe dans la chaudière, il se produit, dans le tube M un courant ascendant d'eau chaude jusqu'au réservoir Q, tandis qu'en même temps s'établissent des courants descendants d'eau moins chaude et plus dense, partant de la partie inférieure de ce réservoir, et se rendant respectivement par autant de tubes dans des récipients *b*, *a*, remplis d'eau. Puis de ceux-ci partent de nouveaux tubes dans lesquels le courant descendant se continue jusqu'à d'autres récipients *d*, *c*, et *f*, *e*; enfin, de ces derniers, le courant se continue, par des tubes de retour, jusqu'à la partie inférieure de la chaudière.

Pendant ce double parcours, l'eau chaude cédant sa chaleur sensible aux

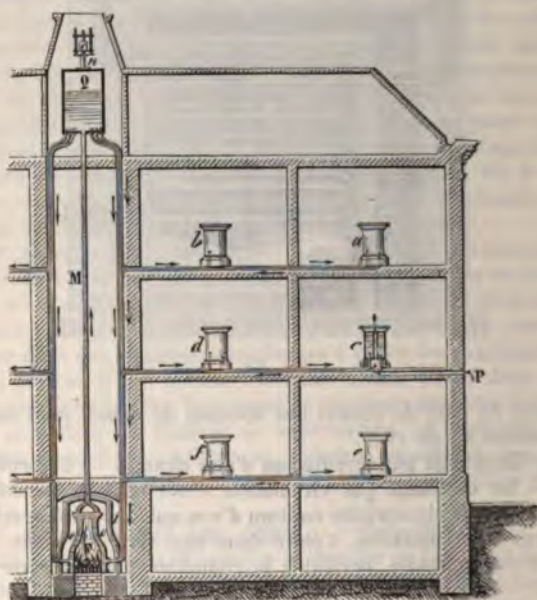


Fig. 657.

tubes et aux récipients, ceux-ci s'échauffent et deviennent de véritables poêles à eau. On en calcule facilement le nombre et les dimensions, pour chauffer un espace déterminé, en s'appuyant sur cette donnée à la fois théorique et empirique, que *un litre d'eau suffit pour communiquer une bonne température à 3200 litres d'air.* Deux de ces poêles suffisent, pendant les froids, pour entretenir 600 à 700 mètres cubes d'air à 15°.

Les récipients *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* sont traversés dans leur axe par des tubes de *fonte* remplis d'air pris à l'extérieur par des tubes P, placés au-dessous du *plancher*. Cet air s'échauffe dans les tubes et se dégage ensuite à la partie *supérieure* des récipients, de manière à ventiler et à chauffer en même temps *l'appartement*.

Avantages et inconvénients des calorifères à eau. — Le principal avantage de ce mode de chauffage est de donner une température sensiblement constante, la masse d'eau contenue dans les récipients et dans les tubes ne se refroidissant que lentement; aussi l'usage en est-il très répandu pour les serres, les étuves, l'incubation artificielle et, en général, dans tous les cas où l'on a besoin d'une température uniforme.

Au point de vue pratique, le calorifère à eau présente l'inconvénient d'exiger un temps assez long pour être mis en train. La circulation ne peut s'établir qu'autant que la température de l'eau est déjà portée à un degré assez élevé. On ne peut donc pas l'employer pour les locaux qu'on a besoin de chauffer en peu de temps et pour peu de temps, comme les amphithéâtres des Facultés ou les salles de spectacle et de concert. L'emploi du calorifère à eau dans ces circonstances serait beaucoup plus dispendieux que celui des calorifères à air.

Appareils à basse pression et *appareils à haute pression.* — Dans le calorifère de Bonnemain, que nous venons de décrire, la température de l'eau ne dépasse jamais et atteint à peine celle de l'eau bouillante. Il est le type des appareils dits *à basse pression.*

On a construit d'autres calorifères à eau, d'après le système de M. Perkins, où le liquide est porté à des températures de beaucoup supérieures à celles de l'eau bouillante (jusqu'à 300°). Ce sont les appareils *à haute pression.* Mais ce système de chauffage, qui est très avantageux au point de vue du rendement calorifique, présente de graves inconvénients. D'abord, il peut causer des incendies, en provoquant la combustion des pièces en bois voisines des tuyaux. De plus, il peut se produire des fuites par les joints ou les fissures des tuyaux, à cause de la haute tension de la vapeur d'eau à ces températures élevées, et alors la vapeur qui s'échappe peut occasionner des explosions ou des ruptures dangereuses [1].

CHAPITRE XVI

NOTIONS ÉLÉMENTAIRES DE THERMODYNAMIQUE.

721. Chaleur dégagée ou absorbée par les actions mécaniques. — Si l'on observe les machines et les mécanismes en marche, on constate qu'ils s'échauffent ou se refroidissent tous en quelques-uns de leurs points, qu'ils renferment ou non un foyer de chaleur. Nous allons en donner quelques exemples.

I. *Frottement. — Le frottement de deux corps l'un contre l'autre développe de la chaleur.*

1. Voir dans Guillemin, *Monde physique*, t. IV, des détails intéressants sur les différents modes de chauffage.

1° Souvent les boîtes des roues de voitures, par suite du frottement contre leurs essieux, s'échauffent jusqu'à prendre feu.

2° *Expérience de Davy.* — H. Davy a fondu deux morceaux de glace en les frottant l'un contre l'autre dans une atmosphère dont la température était au-dessous de zéro.

3° *Expérience de Rumford.* — Rumford fit, en 1790, une mémorable expérience. Il trouva que, en forant sous l'eau une masse de bronze pour obtenir 250 g de limaille, on développait par le frottement une chaleur capable d'élever 25 kg d'eau de zéro à 100°, soit 2500 calories.

4° *Expériences de Beaumont et Mayer.* — Beaumont et Mayer construisirent à Paris, en 1855, un appareil dans lequel ils chauffaient en quelques heures 400 litres d'eau, de 10° à 150° : un cône de bois recouvert de chanvre frottait, en tournant à 400 tours par minute, dans un cône de cuivre creux, fixe et plongé dans l'eau d'une chaudière hermétiquement close; les surfaces frottées étaient constamment graissées d'huile.

Fig. 658.

5° *Expérience de Tyndall.* — Tyndall a imaginé un petit appareil qui rend très manifeste la chaleur développée par le frottement. Il se compose d'un tube de laiton, de 10 cm de hauteur et 2 cm de diamètre, auquel on peut imprimer un mouvement de rotation rapide au moyen d'un mécanisme très simple (fig. 658). On le remplit d'eau tiède et on le ferme avec un bouchon. Tandis que d'une main on fait tourner le système, de l'autre on serre le tube entre deux planchettes à rainures qui forment les branches d'une sorte de pinces plates en bois. Le tube s'échauffe alors rapidement par le frottement, et lorsque la température de l'eau dépasse 100°, le bouchon est projeté par la tension de la vapeur. L'expérience peut se faire avec l'éther et exige moins de temps.

6° *Briquet.* — Dans le briquet à pierre, c'est le frottement de l'acier contre le silex qui échauffe les parcelles métalliques qui s'en détachent, au point de leur faire prendre feu dans l'air.

II. *Compression et décompression.* — Lorsqu'on bat sur l'enclume un métal *malléable*, on l'échauffe considérablement. Si l'on comprime un corps de manière à en augmenter la densité, sa température s'élève d'autant plus que la *diminution* de volume est plus grande. Peu sensible dans les liquides, ce phéno-

mène l'est davantage dans les solides; dans les gaz, qui sont extrêmement compressibles, il y a un dégagement de chaleur considérable (expérience du briquet à air). Inversement, en se décomprimant et repoussant une résistance, un gaz se refroidit.

1° *Expériences de Tyndall.* — On prend un vase de métal à parois résistantes, et muni d'un robinet sur lequel on visse une pompe de compression. Si l'on comprime l'air dans le vase, on constate d'abord que le gaz s'est échauffé par la compression. On le laisse alors refroidir jusqu'à ce qu'il soit revenu à la température ambiante. Lorsqu'on ouvre ensuite le robinet, l'air s'élance violemment, expulsé par sa propre force expansive, et l'on constate qu'il *se refroidit* en même temps. En effet, si l'on reçoit le jet de gaz sur la pile thermo-électrique (fig. 659), le galvanomètre indique, par le sens de sa déviation, un abaissement de température.

Au contraire, si l'on répète l'expérience avec un soufflet ordinaire, et si l'on

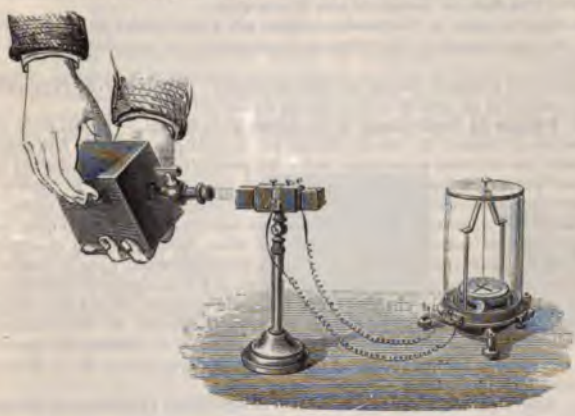


Fig. 659.

reçoit encore le jet de gaz sur la pile, la déviation de l'aiguille du galvanomètre se fait dans le sens opposé, ce qui fait voir qu'il y a échauffement.

Il faut remarquer que ces deux phénomènes inverses correspondent à des conditions mécaniques opposées. En effet, dans la première expérience, le travail mécanique étant exécuté par l'air lui-même, une portion de sa chaleur est consommée dans cet effort, tandis que dans le cas du soufflet c'est la main de l'expérimentateur qui exécute le travail.

2° *Expérience de la marmite de Papin.* — Lorsqu'on ouvre la soupape d'une marmite de Papin surchauffée, de manière à laisser partir un jet de vapeur, celle-ci se refroidit tellement par son travail de détente, que non seulement on peut y mettre la main sans danger, mais qu'on y ressent même une impression de froid.

III. *Choc et percussion.* — Lorsqu'on laisse tomber une bille d'ivoire sur un corps dur, elle rebondit en vertu de son élasticité, mais elle ne s'échauffe pas. Mais qu'on laisse tomber une bille de plomb, qui n'est pas élastique et ne rebondit pas, elle s'échauffe sensiblement, comme si sa force vive était transformée en chaleur. De même, lorsqu'on tire une balle contre une plaque de tôle

qui l'arrête brusquement, le plomb s'aplatit, et en même temps s'échauffe, jusqu'à un degré qui peut atteindre le point de fusion.

Lorsque, pour essayer les plaques destinées au blindage des navires cuirassés, on tire dessus au canon, on voit les boulets, au moment où ils se trouvent arrêtés au contact du blindage, atteindre brusquement la température du rouge.

722. **Corrélation entre la chaleur et le travail.** — Il résulte de tous ces faits et expériences que, d'une manière générale, les frottements, les chocs, et toutes les résistances passives qui paraissent consommer en pure perte du travail moteur, *engendrent de la chaleur*. Dans tous les cas où il y a *destruction apparente de travail* ou de *force vive*, il y a *apparition de chaleur*. Inversement, toute *création apparente de travail* est accompagnée d'une *destruction de chaleur*[1].

En un mot, la chaleur est, comme la force vive, une forme de l'*énergie*.

Il est donc obligatoire d'introduire la chaleur au même titre que le travail et la force vive dans les considérations dynamiques.

On constitue ainsi la *Thermodynamique*, qui a pour objet de fixer, par une voie *tout expérimentale*, les relations numériques qui unissent le travail et la chaleur.

Celles-ci se groupent autour de deux principes : le *principe de l'équivalence de la chaleur et du travail* et le *principe de Carnot*.

723. **Principe de l'équivalence de la chaleur et du travail.** — Le fait de la transformation en chaleur du travail détruit est précisé par un autre fait général : *il existe une relation numérique entre les quantités de travail détruit et de chaleur correspondante*. Cette relation est *indépendante de la nature* des corps et des phénomènes qui servent d'intermédiaire pour opérer cette transformation. On a constaté par des expériences nombreuses et variées que, toutes les fois que les substances intermédiaires n'ont éprouvé aucun changement moléculaire et se sont retrouvées, à la fin de l'expérience, dans le même état physique ou chimique qu'au commencement, il y a *équivalence absolue* entre le travail détruit et la chaleur créée : *à toute quantité de chaleur disparue correspond une quantité déterminée de travail effectué*, et réciproquement, *pour tout travail anéanti il y a une certaine quantité de chaleur qui apparaît* : c'est ce fait constant qui constitue le *principe de l'équivalence de la chaleur et du travail*.

724. **Équivalent mécanique de la calorie et équivalent calorifique du kilogrammètre.** — On a nommé *équivalent mécanique de la chaleur*, ou mieux *équivalent mécanique de la calorie*, le travail (évalué en kilogrammètres) qui correspond à la disparition de l'unité de chaleur. Inversement, on appelle *équivalent calorifique du travail*, ou mieux *du kilogrammètre*, la quantité de chaleur (évaluée en calories) qui correspond à la disparition de l'unité de travail. Ces deux coefficients sont évidemment inverses l'un de l'autre. La moyenne d'un grand nombre de mesures a donné pour l'équivalent mécanique 426 kilogrammètres.

On a déterminé l'équivalent mécanique de la chaleur à la fois par des méthodes directes, dont le type est l'expérience de Joule (1845) et par des méthodes indirectes, dont le type est le calcul du Dr Mayer (1842). Nous exposerons le principe des unes et des autres.

1. Cette corrélation intime entre la chaleur et le travail mécanique était complètement inexplicable dans l'hypothèse du *fluide calorique*, cause des phénomènes calorifiques. Si l'on admet, au contraire, l'*hypothèse dynamique*, c'est-à-dire si l'on attribue la chaleur à un mouvement vibratoire particulier de la matière, elle devient une grandeur de même nature que la force vive, et le lien mystérieux qui l'unit au travail mécanique devient une conséquence nécessaire du principe général de la conservation de l'énergie.

725. Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur : Méthodes directes de détermination. — Rappelons que l'on sait mesurer un travail en kilogrammètres et une quantité de chaleur en calories. Il est donc facile, en évaluant d'une part le travail dépensé sur un système donné, et d'autre part la chaleur qui y est produite, *le système étant, à la fin de l'expérience, dans le même état qu'au commencement*, de déterminer la quantité de travail nécessaire à la création d'une calorie.

I. *Diverses formes de production et d'expression du travail.* — On se place de préférence dans des conditions où le travail utilisé est facile à apprécier.

1° Si on l'emprunte, par exemple, à la chute d'une masse M, tombant d'une hauteur h, il a pour valeur Mgh. Toutefois si, après avoir franchi la hauteur h, la masse possède encore une vitesse v $\left(\text{et par suite une puissance vive } \frac{Mv^2}{2}\right)$, au moment de l'arrêt, le travail transformé en chaleur sera égal seulement à $Mgh - \frac{Mv^2}{2}$ (expériences de Joule)

Si l'on prend comme unités de masse, de longueur et de temps le kilogramme, le mètre et la seconde, ce travail est exprimé en kilogrammètres[1].

2° Le travail, de quelque manière qu'il soit produit, peut être équilibré par un couple constant (F, —F) appliqué en AB (fig. 660) : la force F restant tangente au cercle O de rayon r, le travail de cette force, pour un tour, est égal à $F \times 2\pi r$; le travail de la force — F, que rien ne distingue de la précédente, est aussi $F \times 2\pi r$; le travail total a donc pour valeur $2F \times 2\pi r$ ou (en désignant le bras de levier $2r$ par l) $2\pi Fl$.

Si on transforme en chaleur le travail de n tours, on aura pour expression de ce travail :

$$W = 2\pi nFl.$$

Fig. 660.

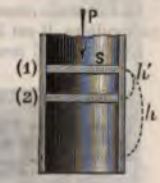


Fig. 661.

3° Examinons encore le cas où le travail résulte de la variation de volume d'un corps soumis à une pression extérieure uniforme, dont la valeur est p par unité de surface (fig. 661).

Considérons un corps cylindrique fermé par un piston mobile de surface S, lequel passe, sous l'action de la pression pS, de la position (1) à la position (2). Si la pression reste constante pendant le déplacement, on a

$$W = pS \times h' = pSh';$$

or Sh' est la variation de volume Δv subie par le cylindre : donc $W = p\Delta v$.

II. *Représentation et évaluation du travail.* — On peut représenter graphiquement ce travail par l'aire d'un rectangle ayant pour dimensions p et Δv (fig. 662). Pour une variation de volume consécutive $\Delta v'$, p prenant une nouvelle valeur p', le travail correspondant sera représenté par l'aire du rectangle voisin de dimensions p' et $\Delta v'$, et ainsi de suite.

Si p varie d'une manière continue, les points M seront sur une courbe et l'ensemble des rectangles précédents sera remplacé par une aire curviligne telle que OABC (fig. 663). En construisant la courbe AB, qui peint le mode de variation

1. On l'exprimera en *ergs*, en choisissant comme unités le gramme, le centimètre et la seconde.

de la pression spécifique p, sur une feuille homogène, on aura le moyen d'obtenir l'aire, et par suite le travail W : il n'y aura qu'à peser la portion OABC de la feuille, et à diviser le poids total par le poids de l'unité de surface.

III. *Cas des gaz : Transformations isothermes et Courbes isothermes. — Cycles fermés.* — Ce procédé de représentation est très commode lorsqu'il s'agit des gaz. Supposons qu'une masse gazeuse soit maintenue à température constante ; on sait (loi de Mariotte) que les états successifs que

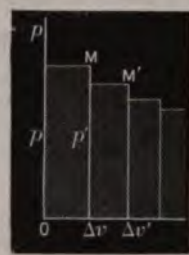


Fig. 662.

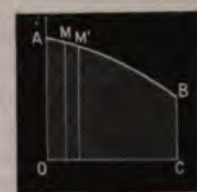


Fig. 663.

peut prendre cette masse satisfont tous à la relation [1] $pv =$ constante.

La constante change avec la masse gazeuse considérée et avec la température particulière. Il est bon de tout rapporter à l'unité de masse.

L'équation [1] peut se représenter par une courbe facile à construire : c'est

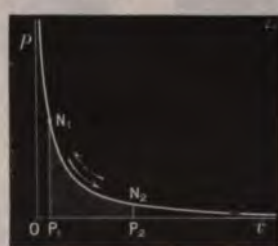


Fig. 664.

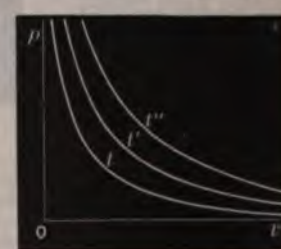


Fig. 665.

une *hyperbole équilatère*, dont l'axe à coordonnées positives convient seul.

Si le gaz passe de l'état [1] à l'état [2], le travail de la force élastique est, d'après ce qui précède, mesuré par l'aire $N_1 N_2 P_2 P_1$ (fig. 664). Dans le passage inverse, le gaz reçoit, en se contractant, le même travail provenant des résistances extérieures.

Lorsqu'un système change d'état sans que sa température varie, on dit qu'il subit une transformation *isotherme*. Dans les gaz, les transformations isothermes sont donc représentées par des courbes, dites *isothermes*, t, t', t'', ..., qui sont des hyperboles équilatères (fig. 665).

On peut obliger le gaz à suivre une transformation quelconque représentée *par une courbe quelconque* telle que AB (fig. 665), la relation $pv = p_0 v_0 (1 + \alpha t)$ *permettant* de calculer la température pour chaque état traversé. Si le gaz *revient à* son état initial, on dit qu'il a pris une suite d'états formant un

cycle fermé. L'aire enveloppée MPNM (fig.668) mesure oujours le travail relatif à la transformation.

726. **Expériences de Joule.** — I. Joule s'est d'abord servi d'un calorimètre à eau dans lequel tournait un arbre vertical muni de palettes (fig. 666). La rotation s'opérait par l'intermédiaire de deux cordons enroulés dans le même sens sur un treuil fixé à l'arbre des palettes, mais se déroulant suivant deux tangentes diamétralement opposées; ils allaient passer sur deux poulies a et b, entraînées en sens contraires par deux poids égaux p et q.

En représentant par P la somme des poids p et q, mesurée en kilogrammes, par h la hauteur de chute mesurée en mètres, le travail développé pendant la descente était Ph kgm. Ce travail, étant détruit par la résistance que l'eau oppo-

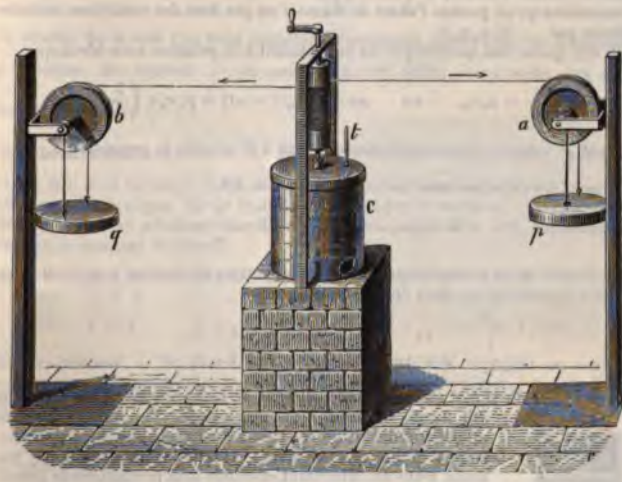


Fig. 666.

sait au mouvement des palettes, se transformait en chaleur et échauffait le liquide d'un nombre de degrés θ, mesurés par le thermomètre t. Connaissant θ, le poids μ ($= m'c$) du calorimètre réduit en eau et le poids m de l'eau, on obtenait par la formule $(\mu + m)\,\theta$ la quantité totale de chaleur, équivalente au travail total, et par le quotient $\frac{Ph}{(m+\mu)\,\theta}$ le travail correspondant à une seule calorie, c'est-à-dire l'*équivalent mécanique de la calorie*.

Corrections. — Toutefois, dans cette expérience, tout le travail des poids n'était pas détruit par le frottement de l'eau; une partie était employée à vaincre les frottements du mécanisme, ou anéantie par le choc des poids contre le sol à la fin de leur chute (715, I, 1°) : toutes ces pertes accessoires étaient évaluées, puis déduites du travail total.

Résultats. — En prenant la moyenne d'un grand nombre d'expériences, Joule a trouvé pour l'équivalent mécanique de la chaleur le nombre 424 kilogrammètres.

II. Joule a encore déduit l'équivalent mécanique de la chaleur de la compres-

sion de l'air dans un calorimètre à eau, de la quantité de chaleur développée par le frottement de deux corps solides l'un contre l'autre dans un calorimètre *à mercure*, etc.

Remarque. — *Autres mesures directes.* — En France, M. Hirn, M. Favre et beaucoup d'autres physiciens ont mesuré l'équivalent de la chaleur. La moyenne de ces diverses expériences est 426 kgm. Le nombre inverse, c'est-à-dire $\frac{1}{426}$, représente l'*équivalent calorifique du kilogrammètre.*

727. **Méthodes indirectes.** — *Calcul de E par l'intermédiaire de* $\frac{C}{c}$. — Considérons tout d'abord les deux coefficients thermiques que nous avons définis ci-dessus (671), la chaleur spécifique à pression constante C et la chaleur spécifique à volume constant c.

Supposons qu'on prenne l'unité de masse d'un gaz dans des conditions initiales définies par [1] v, p, t.

On sait qu'un état quelconque du gaz satisfait à la relation caractéristique

$$[\mathrm{II}] \quad \frac{pv}{1+\alpha t} = p_0 v_0, \quad \text{ou} \quad pv = p_0 v_0 (1+\alpha t) = p_0 v_0 \alpha \left(\frac{1}{\alpha} + t\right),$$

v_0 étant le volume de la même masse de gaz à 0° et sous la pression p_0.

On peut écrire cette équation [II *bis*] $pv = \mathrm{RT}$,

en posant $\mathrm{R} = p_0 v_0 \alpha$ et $\mathrm{T} = \frac{1}{\alpha} + t$ [1].

Supposons qu'on communique au gaz les quantités de chaleur c ou C; il prendra successivement les deux états suivants :

[2]	v,	$p + \Delta p$,	$t + 1$,	(c)
[3]	$v + \Delta v$,	p,	$t + 1$.	(C)

Pour passer du 2e état au 3e (fig. 667), il suffit de ménager au-dessus du piston qui limite ce volume v, un espace vide Δv et d'établir une communication de volume négligeable entre v et Δv. D'après une expérience due à Gay-Lussac et répétée par Joule, cette détente, étant effectuée sans production de travail extérieur, ne modifie en rien la température du système gazeux. Le passage de l'état [1] à l'état [2] ne diffère du passage de [1] à [3] qu'en ce qu'il y a eu, dans ce dernier, un travail extérieur produit égal à $p_0 \Delta v$.

Fig. 667.

La quantité de chaleur C a été employée d'abord à alimenter ce travail, ce qui exige $\frac{p\,\Delta v}{\mathrm{E}}$ calories, puis à élever la température du gaz de 1°, ce qui correspond, d'après la remarque précédente, à la chaleur c.

1. On sait que $\alpha = \frac{1}{273}$. Si p_0 est la force élastique normale, et s'il s'agit de l'air, on a, dans le système C. G. S.,

$$\mathrm{R} = 76 \times 13{,}6 \times 981 \times \frac{1}{273} \times \frac{10^3}{1{,}295},$$

car $p_0 = 76 \times 13{,}6\ \tau$, $\alpha = \frac{1}{273}$, $v_0 = \frac{1000^{\mathrm{cmc}}}{1^{\mathrm{gr}},295}$.

On peut donc écrire l'égalité

$$C = c + \frac{p\,\Delta v}{E}, \qquad \text{d'où} \qquad C - c = \frac{p\,\Delta v}{E}.$$

Comme $pv = RT$, on a $p(v + \Delta v) = R(T + 1)$;

d'où $p\,\Delta v = R$.

Donc $C - c = \frac{R}{E}$, et par suite, en posant $\frac{C}{c} = \gamma$,

$$\text{[III]} \qquad E = \frac{R}{C - c} = \frac{R}{C\left(1 - \frac{1}{\gamma}\right)}.$$

Il résulte de là que l'on peut calculer l'équivalent mécanique de la calorie en fonction du rapport $\frac{C}{c}$. On connaît R et C (672); il ne reste plus qu'à mesurer le rapport $\frac{C}{c}$.

728. **Détermination de $\frac{C}{c}$.** — I. *Étude des transformations d'une masse de gaz.* — Des trois facteurs, force élastique, volume, température, deux seulement sont arbitraires, car le troisième est fixé par la relation [I] $pv = RT$.

On peut donc se proposer de passer d'un état initial à un état final déterminé en se donnant d'avance :

soit p et v, de manière que l'état final soit $p + \Delta p$ $v + \Delta v$,
soit p et t — — $p + \Delta p$ $t + \Delta t$,
soit v et t — — $v + \Delta v$ $t + \Delta t$.

1° *Cas général.* — Supposons qu'on donne à deux des variables un certain accroissement, il en résultera pour la troisième un accroissement défini par l'équation

$$(p + \Delta p)(v + \Delta v) = R(T + \Delta T),$$

qui, en tenant compte de l'équation fondamentale, devient

$$\text{[IV]} \qquad v\Delta p + p\Delta v = R \times \Delta T.$$

Telle est la relation qui lie les trois variations Δp, Δv, ΔT.

2° *Cas particuliers.* — *v reste constant* : on a

$$\Delta v = 0 \qquad \text{avec} \qquad \Delta T' = \frac{v}{R}\,\Delta p. \qquad \text{[IV } bis\text{]}$$

p reste constant : on a

$$\Delta p = 0 \qquad \text{avec} \qquad \Delta T'' = \frac{p}{R}\,\Delta v. \qquad \text{[IV } ter\text{]}$$

3° *Équation générale de la variation de chaleur.* — Prenons maintenant p et v comme variables indépendantes; *imaginons* que le passage de l'état (p, v) à l'état $(p + \Delta p, v + \Delta v)$ (que nous pouvons supposer aussi voisin que nous voulons) s'effectue en deux temps. Tout d'abord le volume est maintenu constant, le gaz passe de l'état (p, v) à l'état $(p + \Delta p, v)$; puis, la pression conservant désormais la valeur $p + \Delta p$, le volume varie et prend la valeur $v + \Delta v$.

[V] $$\Delta Q = c\,\frac{v}{R}\,\Delta p +$$

Remarque. — *Justification de l'équatio*
quelconque à l'état voisin N (fig. 668) peut
formations différentes, c'est-à-dire que le p
infinit
de M
ordre
princi
entre
MPN e
respon
quel
viligne
rieure
sensibl
correc
somm
comm
aux te

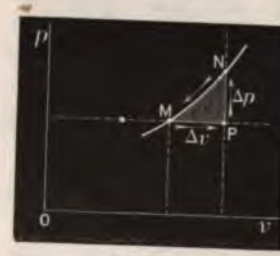


Fig. 668.

La f
toutes les transformations.

II. *Cas d'une transformation adiabatiq*
Desormes. — Lorsque le système gazeux
rieur, de manière qu'il ne rayonne ni ne re
une transformation *adiabatique.* Dans ce
nulle et la relation [V] donne, en y faisan

$$0 = c\,\frac{v}{R}\,\Delta p + C\,\frac{p}{R}\,\Delta v, \qquad \text{ou}$$

Ce résultat fournit un moyen de détermi

[VI] $$\frac{C}{c} = -\frac{v\Delta p}{p\Delta v} = -$$

gaz intérieur. Il en résulte que, si l'on considère l'*unité de masse* de ce gaz, qui était d'abord dans l'état

[1] $v, \qquad H - h, \qquad t,$

cette masse s'échauffe et prend l'état

[2] $v - \Delta v, \qquad H, \qquad t + \Delta t.$

On constate, en effet, immédiatement après la fermeture du robinet, que la colonne d'acide sulfurique s'abaisse jusqu'à devenir nulle.

Fig. 669.

Puis la masse intérieure se refroidit et reprend la température ambiante Ensuite, après refroidissement, la pression diminue et le liquide monte de nouveau dans le tube CT jusqu'à la hauteur h'. L'état final de l'unité de masse du gaz est donc

[3] $v - \Delta v, \qquad H - h', \qquad t.$

Le passage de [1] à [2] s'étant effectué adiabatiquement en raison de son instantanéité, on peut appliquer l'équation [VI] à cette transformation : on a donc

$$\frac{C}{c} = \frac{v}{\Delta v}\,\frac{h}{H - h}.$$

La variation de volume Δv était donnée par la comparaison des états [1] et [3], dans lesquels l'unité de masse du gaz a subi une variation de volume et de pression à *température constante*. La loi de Mariotte fournit la relation

$$v(H-h) = (v-\Delta v)(H-h'), \qquad \text{ou} \qquad \frac{H-h}{H-h'} = \frac{v-\Delta v}{v} = 1 - \frac{\Delta v}{v};$$

doù

$$\frac{v}{\Delta v} = \frac{h-h'}{H-h'}$$

et par suite

$$\frac{C}{c} = \frac{h}{H-h} \cdot \frac{H-h'}{h-h'}.$$

Et, en remarquant que le rapport $\frac{H-h'}{H-h}$ est sensiblement égal à l'unité, h et h' étant des quantités très petites par rapport à H, il vient enfin

$$\frac{C}{c} = \frac{h}{h-h}.$$

L'expérience consistait donc simplement à mesurer, dans chaque cas, les hauteurs h et h'.

Résultats. — Clément et Desormes trouvèrent, comme moyenne de leurs diverses expériences, le nombre 1,354. Leur méthode, reprise par divers expérimentateurs, a fourni des nombres très différents, qui varient depuis 1,354 jusqu'à 1,405 (expériences de Röntgen).

L'écart est encore plus grand si on compare ces nombres à ceux qui ont été obtenus par l'application de la formule de Laplace sur la vitesse du son, car ces nombres varient entre 1,401 et 1,410.

Le même écart existe naturellement entre les deux nombres qu'on déduit de l'équation [3] pour l'équivalent mécanique de la chaleur. Cela montre l'intérêt qu'il y a à reprendre ces mesures à l'aide d'un dispositif expérimental plus précis. C'est ce que nous avons fait nous-même par une méthode nouvelle, dont les résultats seront publiés prochainement.

729. **Principe de Carnot.** — Il est aussi impossible, d'après Sadi-Carnot, d'établir un moteur thermique[1] dans lequel de la chaleur ne passerait pas d'une région chaude à une région froide, qu'il serait impossible d'actionner un *moteur hydraulique* sans chute d'eau.

Dans un moteur thermique, la chaleur prise au foyer n'est pas intégralement portée au condenseur; en effet, il résulte directement du *principe de l'équivalence* qu'à chaque quantité de travail produit, égale à 426 kilogrammètres, correspond la destruction d'*une calorie kgdg* (grande calorie).

Si W est le travail fourni et Q le nombre de calories puisées par l'agent qui pousse le piston, il est clair que le *rendement* R du moteur peut s'exprimer par le rapport $R = \frac{W}{EQ}$.

D'après le principe de Carnot, le rendement R ne peut jamais être égal à l'unité; en d'autres termes, *un moteur thermique en marche porte toujours à la région froide* (condenseur) *une fraction de la chaleur prise à la région chaude* (chaudière).

Il est clair qu'alors le rendement R est forcément inférieur, ou au plus égal, à un nombre $R' < 1$, qui correspond à un *rendement maximum*. A quelle caté-

1. Nous verrons (733) qu'on définit *moteur thermique* tout appareil au moyen duquel on peut transformer de la chaleur en travail.

gorie de moteurs thermiques faut-il attribuer ce rendement maximum R' ?

Pour répondre à cette question, il faut tout d'abord concevoir un moteur thermique dans lequel le corps mis en jeu peut à chaque instant reprendre l'état antérieur infiniment voisin. Un tel moteur est dit *réversible* : il pourra absorber le travail produit par un autre moteur quelconque, prendre de la chaleur à la source froide et en porter à la source chaude. Il est caractérisé par la propriété suivante.

THÉORÈME. — *Tous les moteurs thermiques réversibles, fonctionnant entre les deux mêmes sources, ont le même rendement.*

Soient M et M_1 deux moteurs réversibles, fonctionnant entre les deux mêmes sources et dans des conditions telles, que, prenant à la source chaude les quantités de chaleur q et q_1, ils transportent à la source froide une *même* quantité q' de chaleur.

Les deux moteurs fourniront respectivement les travaux

$$E(q - q'), \qquad E(q_1 - q').$$

Agençons les deux moteurs de façon à obliger M à fonctionner en sens inverse, sous l'action de M_1. Si on suppose $q_1 > q$, la combinaison (M, M_1) fournira encore le travail

$$E(q_1 - q') - E(q - q') = E(q_1 - q),$$

et cela sans qu'il y ait de chaleur portée à la source froide, puisque celle-ci fournit q' calories à M et reçoit q' calories de M_1.

Cette conséquence étant en contradiction avec le principe de Carnot, on ne peut pas avoir $q_1 > q$, c'est-à-dire

$$E(q_1 - q') > E(q - q') \qquad \text{ou} \qquad R_1 > R,$$

puisque

$$R_1 = \frac{E(q_1 - q')}{Eq'}, \qquad R = \frac{E(q - q')}{Eq'};$$

donc on a

$$R_1 \leqslant R.$$

Cette conséquence est indépendante de la nature du moteur M_1.

Donc *Un moteur, quel qu'il soit, ne peut pas avoir un rendement supérieur à celui d'un moteur réversible.*

Si le moteur M_1 est réversible, on peut, dans la démonstration précédente, lui faire jouer le rôle de M. On arriverait ainsi à la conclusion

$$R \leqslant R_1.$$

Les conditions simultanées

$$R_1 \leqslant R, \qquad R \leqslant R_1$$

exigent l'égalité

$$R = R_1 = R'.$$

Donc *Tous les moteurs thermiques réversibles ont le même rendement maximum* R'.

REMARQUE. — Ces raisonnements supposent que les moteurs considérés fonctionnent entre les deux mêmes sources, sans quoi le rendement R' ne serait pas déterminé. On voit de plus que la *nature* de l'agent en transformation dans la machine n'intervient pas.

Remarque — De l'égalité

$$\frac{E(q_1 - q')}{Eq'} = \frac{E(q - q')}{Eq'}$$

on tire

$$\frac{q_1}{q'} = \frac{q}{q'}.$$

On a donné au rapport $\frac{q'}{q}$ le nom de *coefficient de perte* de la machine.

On peut donc donner du théorème précédent ce nouvel énoncé : *Les machines réversibles, fonctionnant entre les deux mêmes sources, ont le même coefficient de perte.*

730. **Cycle de Carnot.** — On appelle *Cycle de Carnot* un quadrilatère curviligne (fig. 670), dont deux des côtés opposés sont des arcs d'isothermes et les deux autres des arcs d'adiabatiques.

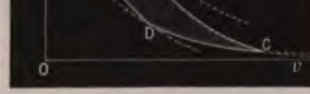


Fig. 670.

Une machine dont l'agent subit des transformations représentées par un cycle de Carnot est réversible. En effet, l'agent (la vapeur, par exemple) est toujours en contact avec des corps dont la température diffère infiniment peu de la sienne et les variations de volume peuvent s'effectuer graduellement, de manière que la pression extérieure exercée sur le piston reste infiniment voisine de celle de la vapeur.

La machine est donc dans des conditions infiniment voisines de ses conditions d'équilibre, ce qui rend sa marche possible à chaque instant dans un sens ou dans l'autre.

731. **Températures absolues.** — Voici comment M. G. Lippmann a fait servir le principe de Carnot à la définition des *températures absolues*, c'est-à-dire indépendantes de l'agent thermométrique.

Considérons des corps

$$A, \quad A', \quad A'', \quad A''', \ldots,$$

en fusion ou en ébullition. Ils constituent une série de températures physiques bien déterminées.

Associons successivement à l'isotherme A les isothermes A', A'', A''', ...; soient $q, q', q'', q''', \ldots$, les quantités de chaleur mises en jeu par une machine réversible fonctionnant entre (A et A'), (A et A''), ... Ce sont les quantités de chaleur

$$[1] \qquad q, \quad q', \quad q'', \quad q''', \ldots,$$

que M. Lippmann considère comme mesurant les températures des sources

$$A, \quad A', \quad A'', \quad A''', \ldots, \quad \text{etc.}$$

Il est clair qu'il est nécessaire, pour fixer l'échelle, de prendre arbitraire-

ment q par exemple; alors q' sera fixé par le coefficient de perte

$$\frac{q'}{q}$$

du moteur réversible fonctionnant entre A et A'.

On peut démontrer, — par un raisonnement analogue à celui qui a servi à établir le théorème précédent, — que la suite [1] est unique, en d'autres termes que le coefficient de perte d'un moteur réversible fonctionnant entre les sources A'' et A''', par exemple, a pour valeur

$$\frac{q'''}{q''}.$$

Remarques. — Lorsqu'on emploie les quantités de chaleur q, q', q'',..., pour mesurer les températures absolues, on les représente par les lettres T, T', T'',.... D'où il suit que le rendement peut s'écrire

$$R = \frac{T - T'}{T}.$$

On démontre que, si t représente la température de la source, relevée au thermomètre normal, la température absolue T est donnée par la relation

$$T = \frac{1}{\alpha} + t \qquad \left(\alpha = \frac{1}{273}\right),$$

en définissant par le nombre 100 la température normale de la vapeur d'eau en ébullition.

732. **Travail musculaire** et **Chaleur animale.** — *Expériences de Hirn.* — Mayer eut le premier l'idée de comparer l'animal à une sorte de machine à feu où la chaleur, due à la respiration, est partiellement transformée en travail musculaire. M. Hirn a confirmé cette hypothèse par l'expérience.

On enfermait un homme dans une espèce de guérite close, et l'on observait les effets calorifiques et chimiques de sa respiration, d'abord lorsqu'il était au repos, puis lorsqu'il travaillait à élever son propre poids sur la circonférence d'une roue mobile. Deux tubes de caoutchouc aboutissaient à la bouche du sujet, l'un lui amenant, d'un gazomètre jaugé, l'air nécessaire à sa respiration, et l'autre conduisant l'air expiré à un second gazomètre aussi jaugé : cela permettait de mesurer l'oxygène consommé et l'acide carbonique produit. La température de l'air dans la guérite s'élevait progressivement, et devenait constante lorsque la chaleur perdue par le rayonnement égalait celle qui se produisait dans l'organisme. On remplaçait ensuite le sujet vivant par la flamme d'un bec de gaz, qu'on réglait de manière à amener l'air dans la guérite à la même température constante. Du volume du gaz brûlé on déduisait la quantité de chaleur produite par le bec de gaz, et par suite la quantité dégagée par l'homme dans un temps donné.

Au repos, celui-ci consommait 30 grammes d'oxygène par heure pour 150 calories produites: lorsqu'il s'élevait sur la roue, il consommait 150 grammes d'oxygène, et le nombre de calories correspondant, qui aurait dû être de 750, n'était que de 250. Donc 500 calories étaient consommées : 1° par le travail musculaire intérieur ; 2° par le travail extérieur nécessaire pour élever le poids de l'homme.

L'effet inverse s'observe quand un homme reçoit du travail au lieu d'en produire, quand il descend au lieu de monter : à 30 grammes d'oxygène absorbé correspond un dégagement supérieur à 150 calories, l'excès de chaleur étant dû au travail extérieur de la pesanteur pendant la descente.

CHAPITRE XVII

MACHINES THERMIQUES[1].

733. Définitions. — On appelle *machine thermique* ou *machine à feu* ou *moteur thermique* tout appareil qui produit du travail en dépensant de la chaleur. Cette transformation s'opère par l'intermédiaire de la vapeur d'eau ou d'un gaz quelconque, conformément aux principes de la thermodynamique.

La *machine à vapeur* est le type des machines à feu : le gaz intermédiaire est la vapeur d'eau. Un certain poids d'eau, prise à une température initiale t, est amenée au contact d'une source de chaleur (chaudière) ; là elle se transforme en vapeur, à une température t' de beaucoup supérieure à t ; elle passe ensuite dans un cylindre où elle *travaille* en se détendant sur un piston ; de là elle passe dans à un réfrigérant ou *condenseur*, où elle reprend sa température initiale t en reprenant l'état liquide ; enfin, elle est ramenée à la chaudière après avoir parcouru une série de transformations périodiques qui constituent ce qu'on appelle un *cycle fermé* (725, III).

Les machines à vapeur sont les moteurs les plus répandus. Les types en sont extrêmement nombreux, mais on peut les ranger en trois grandes catégories : *machines fixes*, *machines marines* et *locomotives* ; nous les décrirons en détail. Nous indiquerons ensuite les principaux types de *machines à air chaud* et de *machines* ou *moteurs à gaz*.

Toute machine à vapeur se compose de deux parties bien distinctes : celle où se produit la vapeur et celle qui l'utilise. La première est le *générateur de vapeur* ou *chaudière*, la seconde est la *machine* proprement dite.

734. Générateurs de vapeur. — Tout générateur de vapeur consiste en un récipient métallique clos hermétiquement et en grande partie rempli d'eau ; il est exposé à la chaleur d'un foyer qui réduit l'eau en vapeur.

Pour produire les grandes quantités de vapeur nécessaires au fonctionnement des machines, les générateurs doivent avoir de

1. Ce chapitre a été rédigé avec la collaboration de M. Paul Létang, jeune ingénieur de grand mérite, qu'une mort prématurée a enlevé à la science et à l'affection de ses amis, au cours même de la publication de cet ouvrage.

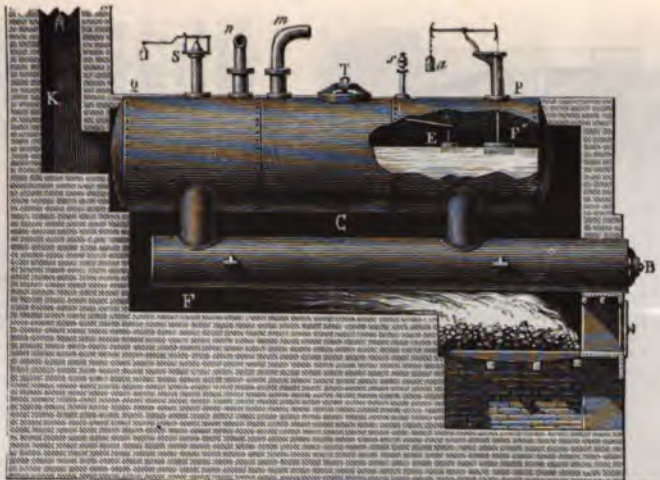


Fig. 671. — Chaudière à bouilleurs.

Fig. 672. — *Idem*. Coupe transversale.

Légende. — E. *Flotteur* du sifflet d'alarme *s*. — F'. *Flotteur* destiné à indiquer le niveau d'eau dans la chaudière. Tant que l'eau s'élève à la hauteur voulue, le levier qui soutient le flotteur est maintenu par la poussée de l'eau et par le *contrepoids a* ; mais il incline vers F' lorsqu'il n'y a pas assez d'eau, et en sens contraire s'il y en a trop. Dans l'un comme dans l'autre cas, le chauffeur est prévenu. S. *Soupape de sûreté*, déjà décrite à propos de la marmite de Papin. T. *Trou d'homme*, qu'on ouvre pour les nettoyages et les réparations du générateur. Il est à fermeture *autoclave*, c'est-à-dire qu'il se ferme lui-même à l'aide d'un couvercle appliqué antérieurement et de bas en haut contre les rebords de la paroi par une vis de pression : plus la tension de vapeur est élevée, plus le couvercle est pressé contre la paroi, et plus la fermeture est hermétique. — *m*. *Tube* qui amène la vapeur à la machine. — *n*. *Tube adducteur* de l'eau d'alimentation. — *s*. *Sifflet d'alarme*. Il fonctionne aussitôt que le niveau baisse au-dessous de la hauteur convenable : alors un petit flotteur E, qui ferme le pied du sifflet, descend et laisse fuir la vapeur qui vient raser les bords d'un disque métallique mince : celui-ci entre en vibration et rend un son très aigu qui *donne l'alarme* au chauffeur.

grandes dimensions et présenter de très grandes surfaces au contact des gaz chauds du foyer. Ils sont encastrés dans une construction en métal ou en maçonnerie qui concentre sur eux les flammes d'un foyer intense.

Nous considérerons successivement la *chaudière à bouilleurs*, qui est le modèle classique, la *chaudière semi-tubulaire*, la *chaudière tubulaire*, la *chaudière à vaporisation instantanée* et la *chaudière locomotive*.

735. **Chaudière à bouilleurs.** — C'est un générateur de *machine fixe*. Elle consiste en un long cylindre de tôle PQ fermé à ses deux extrémités par deux calottes sphériques (fig. 671 et 672).

Au-dessous sont deux cylindres BB, d'un plus petit diamètre,

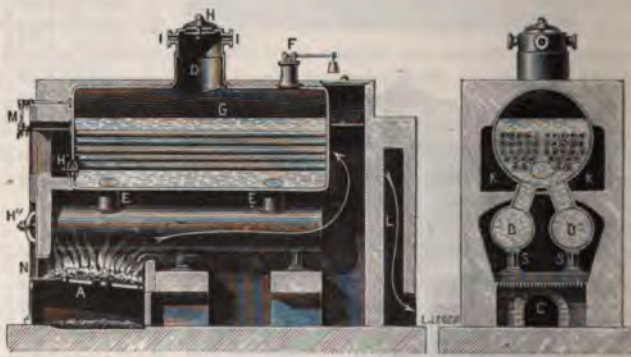


Fig. 673. Chaudière semi-tubulaire. Fig. 674.

également en tôle, et communiquant avec le générateur, chacun par deux tubulures. Ces cylindres se nomment *bouilleurs*. Destinés à recevoir le coup de feu du foyer, ils sont complètement remplis d'eau, tandis que le cylindre PQ l'est seulement à un peu plus d'à moitié.

Au-dessous des bouilleurs est le foyer, dans lequel on brûle de la houille ou du coke. Afin de multiplier la surface de chauffe et d'utiliser toute la chaleur entraînée par les produits de la combustion, on fait circuler ceux-ci dans des conduits de briques qui entourent les parois des bouilleurs et du générateur. Ces conduits, qu'on nomme *carneaux*, divisent le fourneau en deux compartiments horizontaux FF et CD (fig. 671). En outre, le compartiment *supérieur* est divisé en trois carneaux distincts DD et C, par deux

cloisons verticales qui ne sont pas représentées dans le dessin et qui correspondent des deux côtés aux bouilleurs.

La flamme et les produits de la combustion, rasant d'abord le dessous des bouilleurs, d'avant en arrière, reviennent en sens contraire par le carneau central; puis, se divisant, ils se rendent

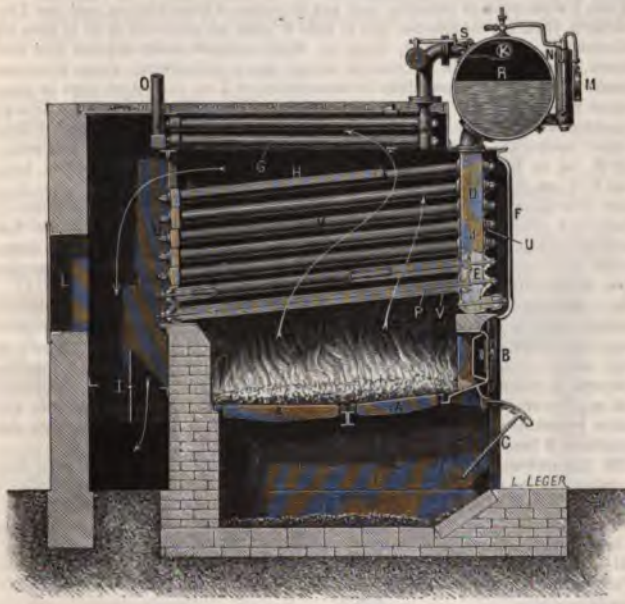


Fig. 675. — Chaudière multitubulaire Collet.

Détails complémentaires. — I, papillon en tôle servant à régler le tirage; K, tuyau adducteur de l'eau d'alimentation de la chaudière; L, ouverture pour le nettoyage du carneau et de la cheminée; M, manomètre métallique indiquant la tension de la vapeur; N, niveau d'eau; O, tuyau conduisant la vapeur à la machine; R, réservoir de vapeur et d'eau; S, soupape de sûreté.

enfin par les carneaux latéraux DD dans le tuyau K de la cheminée, d'où ils se perdent dans l'atmosphère.

736. **Chaudières semi-tubulaires.** — Afin de diminuer l'encombrement des chaudières, tout en leur conservant les mêmes surfaces de contact avec les gaz chauds, on a diminué la longueur des bouilleurs B, B et du corps de chaudière T, G (fig. 675 et 671), mais on a logé dans ce dernier un certain nombre de

tubes que les gaz chauds sont obligés de traverser dans le sens indiqué par les flèches. La chaudière *semi-tubulaire* est munie d'un niveau d'eau M qui indique à chaque instant le niveau du liquide dans l'intérieur.

737. **Chaudières tubulaires.** — Pour aller encore plus loin dans la réduction des dimensions extérieures et augmenter au contraire la surface de chauffe, on a construit des chaudières *uniquement composées de tubes* autour desquels circulent les flammes du foyer (fig. 675).

L'eau d'alimentation refoulée, soit par la pompe d'alimentation, soit par l'injecteur R (742, 2°), est amenée par le tube K dans un réservoir et de là dans un collecteur D, en fonte d'acier, divisé en deux compartiments séparés par une cloison. Par suite de la circulation d'eau due à l'ébullition, l'eau la moins chaude descend peu à peu dans le compartiment E et, s'écoulant dans le tube central P, arrive à son extrémité dans le tube enveloppe V, où elle se trouve en contact avec le foyer. Cette eau, chauffée et mélangée de vapeur, remonte dans le tube extérieur V, puis dans le compartiment J du collecteur jusqu'au réservoir R, où la vapeur se dégage. Aux deux extrémités des tubes, des tampons U, U, en fonte, reliés par des tirants en fer qui traversent les tubes dans toute leur longueur, font une fermeture hermétique. La vapeur, en sortant du réservoir R, traverse les tubes G, dits *surchauffeurs de vapeur*. Ces tubes forment un serpentin aplati, où la vapeur, avant de se rendre à la machine, abandonne les gouttes d'eau entraînées par la vaporisation à circuler autour des tubes surchauffeurs.

On remarquera que, pour une même surface de chauffe, ce type de chaudière contient beaucoup moins d'eau que les chaudières à bouilleurs ou semi-tubulaires; la rupture d'un tube et l'expansion brusque de la vapeur sont donc beaucoup moins redoutables que la rupture d'une tôle dans les deux premiers systèmes. D'autre part, on peut avec ces générateurs fonctionner à des pressions bien supérieures qu'avec les autres, parce que les tubes pouvant résister aux hautes pressions ont une faible épaisseur relativement à celle des tôles des chaudières à bouilleurs de même résistance.

738. **Chaudières** dites **à génération instantanée.** — Poussant encore plus loin la réalisation de cette idée, M. Serpollet est arrivé à construire des générateurs composés d'un simple tube à parois très épaisses et aplati sur lui-même.

Dans ces conditions, quoique la longueur du tube soit assez grande, la capacité de la chaudière est à peu près nulle, tandis que la surface de chauffe est considérable. Il en résulte que l'eau qu'on y introduit est vaporisée *instantanément* et qu'elle doit être renouvelée constamment à mesure que la vapeur est utilisée dans la machine.

Ces générateurs ont l'avantage de permettre la production de la vapeur à haute pression et d'autre part leur explosion serait tout à fait inoffensive, la quantité de vapeur qu'ils renferment étant insignifiante.

739. **Chaudières locomotives.** — Les exigences de la traction nécessitent, pour les *machines locomotives*, des chaudières de peu de volume relatif et d'une grande puissance de vaporisation. Aussi a-t-on créé pour elles une forme de chaudière spéciale dite *locomotive*, qui est également employée pour les *machines locomobiles*. Le foyer est placé au milieu d'une caisse en tôle à doubles parois entre lesquelles est comprise l'eau à vaporiser.

Les gaz chauds et la flamme doivent, avant de se rendre à la cheminée, parcourir des tubes qui sont également entourés d'eau de toutes parts. La surface de chauffe est donc considérable malgré les dimensions réduites de tout le système.

740. **Machines à vapeur proprement dites.** — C'est à l'ingénieur anglais Watt que sont dus les premiers types de machines

à vapeur vraiment industrielles. Ses prédécesseurs, Papin, Newcomen, Jouffroy, n'avaient établi que des modèles rudimentaires, dans lesquels les diverses communications de la vapeur entre la chaudière et le cylindre de la machine s'établissaient au moyen de robinets généralement manœuvrés à la main. L'invention capitale de Watt fut le *tiroir de distribution*, qui sert à faire agir alternativement la vapeur au-dessous et au-dessus du piston, et en même temps à faire échapper, au moment convenable, la vapeur détendue qui vient de travailler.

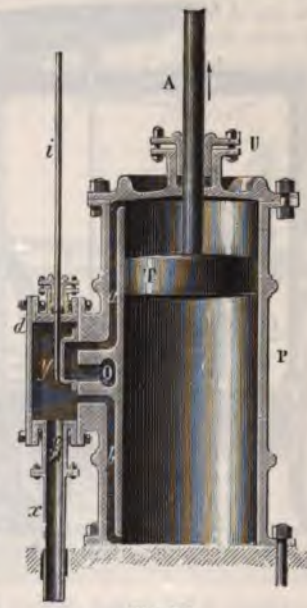


Fig. 676.

1° *Tiroir de distribution de vapeur* — La vapeur arrivant du générateur par le tube x (fig. 676), se rend dans une boîte de fonte d qui est la *boîte à distribution*. De là partent deux conduits a et b, pratiqués dans l'épaisseur même des parois du cylindre, qui peuvent amener la vapeur, l'un au-dessus, l'autre au-dessous du piston. Une pièce mobile y, qu'on nomme *tiroir*, à cause de sa forme, ferme toujours un de ces conduits, grâce au mouvement alternatif de bas en haut de sa tige i. Tant que la vapeur arrive *au-dessous* du piston (fig. 676), la partie supérieure du cylindre est en communication par le conduit a avec une cavité o d'où part un tuyau (non représenté sur la figure), par où se dégage la vapeur qui vient d'agir sur le piston. Puis, quand la vapeur arrive au-dessus du piston, c'est la partie inférieure du cylindre qui communique par le conduit b avec la cavité o. Les conduits a et b servent donc alternativement à l'arrivée et à la sortie de la vapeur.

2° *Échappement libre et condenseur*. — Dans les machines dites *à échappement libre*, la vapeur, après avoir travaillé sous le piston, va s'échapper à l'air par le tuyau qui communique avec la cavité o.

Dans les machines dites *à condenseur*, la vapeur détendue

se rend dans un appareil appelé *condenseur*. Cet appareil n'est autre chose qu'un récipient H (fig. 677) dans lequel un jet d'eau froide est projeté en pluie en sens inverse de l'arrivée de la vapeur. Celle-ci s'y condense en produisant un vide plus ou moins complet.

Si nous comparons deux machines, alimentées par de la

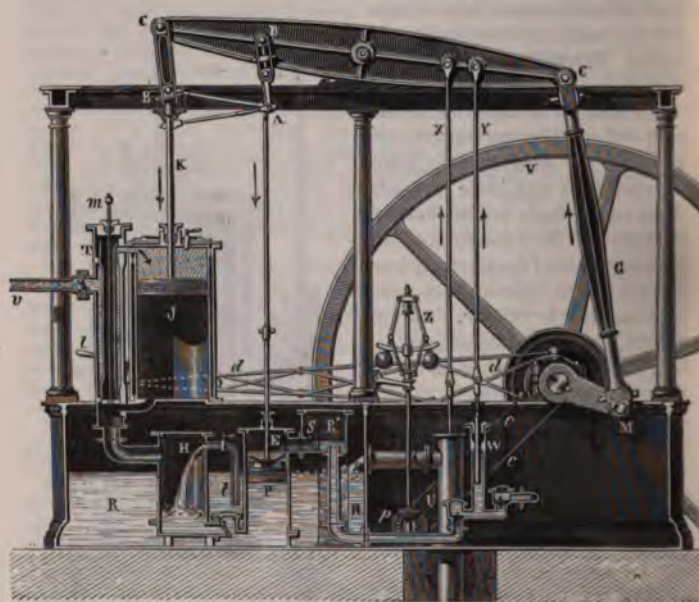


Fig. 677. — Machine à balancier de Watt.

v, tuyau de prise de vapeur; T, tiroir; J, piston; H, condenseur; PE, pompe d'épuisement; WY, pompe alimentaire de la chaudière; UX, pompe d'alimentation de la bâche R; *pZ*, régulateur à force centrifuge; *ddl*, excentrique; ABCD, parallélogramme articulé; GM, bielle et manivelle; V, volant.

vapeur à une même pression, mais fonctionnant l'une à échappement libre et l'autre à condensation, la valeur de la pression effective de la vapeur par unité de surface de chacun des pistons ne sera pas la même. Si par exemple elle est de 3 atmosphères en valeur absolue, la pression utilisable sur le piston de la machine à échappement libre sera de 2 atmosphères seule-

ment, puisque l'autre face est soumise à la pression atmosphérique. Au contraire, dans la machine à condensation, la pression serait de 3 atmosphères, si le vide absolu régnait dans le condenseur. En pratique cela n'a pas lieu; cependant le bénéfice de pression obtenu est au moins de 4/5 d'atmosphère.

741. **Mécanisme de la machine à balancier.** — Les organes de transmission du mouvement, qui constituent le mécanisme proprement dit, sont particulièrement simples dans la première machine de Watt, dite *machine à balancier* (fig. 677). Le piston J, qui est mû par la vapeur dans le cylindre, agit par sa tige K, dont la tête est reliée à un levier BC, sur l'extrémité C d'une longue pièce de fer CC′ mobile, comme un levier du premier genre, autour

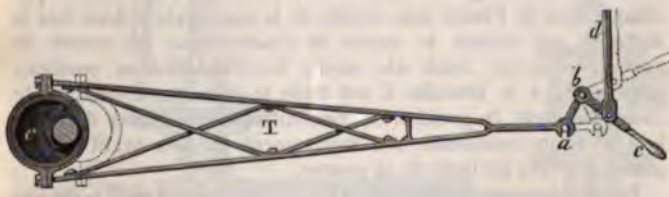


Fig. 678.

d'un axe horizontal passant par son centre, qu'on appelle le *balancier*. A l'autre extrémité C′ de ce balancier est articulée une autre pièce en fer C′M, appelée *bielle de transmission*, qui peut tourner autour d'un axe horizontal placé en C′ sur le balancier. Cette bielle transmet le mouvement au bouton de la manivelle M fixée sur l'axe général de la machine, dit *arbre de couche*, de manière à transformer le mouvement alternatif du piston en un mouvement continu de rotation.

Le volant V, fixé sur l'arbre de couche, a pour but de supprimer l'effet des *points morts*. Quand le piston est arrivé au bout de sa course dans le cylindre, le bouton de la manivelle M se trouve soit tout en haut, soit tout en bas de sa course. Dans ces deux positions, qu'on appelle les *points morts*, l'effort de la bielle CC′ serait complètement annulé par la réaction normale du palier dans lequel tourne l'arbre de la machine. Et, de plus, si l'on ne disposait pas alors d'une certaine quantité d'énergie, précédemment mise en réserve, le déplacement du tiroir, qui est nécessaire au renversement de l'action de la vapeur, ne se produirait pas et le mouvement s'arrêterait. Le volant fait disparaître cet inconvénient, en restituant à l'instant des *points morts*, une partie de

l'énergie qu'il avait emmagasinée, dans son énorme masse, pendant la phase d'activité du piston.

Excentrique. — Cette restitution s'opère au moyen d'un organe spécial *dd*, qu'on appelle l'*excentrique* (fig. 677). Il se compose d'un plateau circulaire *e* (fig. 678) dont le pourtour est creusé d'une gorge. Dans cette gorge vient se placer un collier entourant complètement le plateau circulaire et pouvant tourner librement sur lui. Il est fixé à des tiges de métal T, qui viennent s'articuler en *a* sur l'une des extrémités d'un levier coudé *abc*, mobile autour de l'axe *b*. Suivant l'amplitude du mouvement que l'on veut obtenir, on fixe le plateau sur l'arbre de couche en éloignant plus ou moins son centre de figure du centre de l'arbre. Reliant alors une tige au collier de l'excentrique, on obtient par chaque tour de l'arbre une course de la tige égale à deux fois la distance qui sépare le centre de l'excentrique du centre de l'arbre. Le levier coudé *abc* oscille donc entre deux positions extrêmes[1]. A la branche C est fixée la tige qui commande le tiroir. On règle la position de l'excentrique sur l'arbre de façon que le tiroir commence son mouvement un peu avant que le piston n'arrive au bout de sa course.

Parallélogramme articulé de Watt. — On conçoit qu'il n'est pas

Fig. 679.

possible de joindre directement la tête de la tige du piston à l'extrémité du balancier. Ce dernier point décrit en effet une portion de circonférence dont le centre est dans l'axe des tourillons du balancier, tandis que la tige A doit se mouvoir suivant une droite dans le prolongement de son axe. Watt avait inventé un mécanisme très ingénieux, appelé *parallélogramme articulé*, pour effectuer cette liaison, sans torsion ni flexion des organes. Il est représenté en ABCD sur la figure 677, et en CEDBO sur la figure 679.

La tête du piston est reliée en D (fig. 679) au sommet d'un

1. Elles sont représentées sur la figure 678, l'une en traits pleins, l'autre en pointillé.

parallélogramme CBDE, dont les quatre côtés, rigides et invariables, sont articulés en leurs sommets, de telle manière que les angles varient par suite du mouvement qu'impriment les oscillations du balancier. De plus, le sommet B est rattaché par une tige BO à un point fixe O du bâti de la machine. Les longueurs relatives de ces diverses pièces sont calculées de manière que le sommet D décrive très sensiblement une *ligne droite verticale*, pendant que les points C, E et B décrivent des arcs de cercle ayant pour centres O et o^1.

On comprend que ce système de liaisons se reproduit en double dans le sens de l'épaisseur de chaque côté du balancier. Cela fait

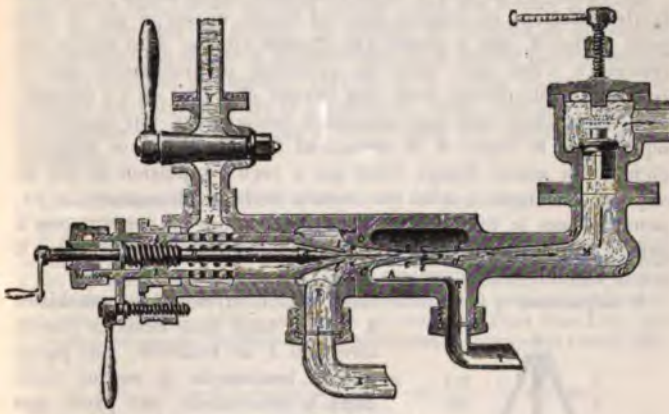


Fig. 680.

qu'en réalité la tige du piston est articulée à un axe horizontal reliant les deux points D.

Condenseur et pompe à air. — La machine de Watt était à condensation : on voit en O le condenseur, et en M la pompe à air chargée d'expulser du condenseur l'air qui se dégage de l'eau soumise à la décompression du vide.

742. Organes accessoires des machines à vapeur. — 1° *Pompes alimentaires.* — Il est nécessaire d'alimenter la chaudière à me-

1. Le point milieu du côté BC possède la même propriété que le point D ; aussi l'utilise-t-on dans les machines de Woolff (746, 4°) où les pistons des deux cylindres doivent se mouvoir d'ensemble. Watt n'avait donné qu'une solution empirique de ce problème ; c'est le mathématicien français Peaucellier qui a *démontré rigoureusement qu'un système articulé de cinq tiges suffit pour transformer le mouvement circulaire en mouvement rectiligne.*

sure que l'eau se vaporise. C'est la machine elle-même qui effectue ce travail en actionnant une pompe aspirante et foulante : la tige G de son piston (fig. 676) recevait son mouvement d'une bielle fixée directement au balancier, dans la vieille machine de Watt; elle est fixée à un excentrique, ou à un bouton de manivelle relié à l'arbre, dans les nouvelles machines.

2° *Injecteur Giffard.* — L'injecteur, inventé par Giffard, remplace généralement la pompe alimentaire. La partie essentielle est une paire de cônes divergents *cc* et *ee* (fig. 680) qui constituent une espèce de trompe à vapeur d'eau, analogue aux trompes à eau ou à mercure.

La vapeur d'eau arrive de la chaudière par le tuyau VV, à une haute pression, et comme elle est forcée de sortir par le très petit orifice *tt*, elle y prend une grande vitesse. A sa sortie elle rencontre l'eau qui vient du réservoir d'alimentation par le tuyau EE; elle pousse cette eau devant elle, tout en s'y condensant, et produit ainsi une aspiration *continue* qui fait monter le liquide par le tuyau E et maintient la boîte à eau *cc* toujours pleine. En même temps l'eau qui a reçu l'impulsion du jet de vapeur, mélangée à celle qui résulte de la condensation du jet, pénètre dans le tube divergent *dd*, y chemine en perdant peu à peu de sa vitesse initiale, et arrive dans le tuyau d'alimentation M qui la conduit à la chaudière.

3° *Régulateur à force centrifuge.* — Le mouvement des machines à vapeur tend sans cesse à s'accélérer ou à se retarder, soit parce que la tension de la vapeur varie dans le générateur, soit parce que le travail demandé à la machine est lui-même plus ou moins considérable. Pour maintenir la vitesse constante, on emploie en général un *régulateur à force centrifuge* Ip (fig. 677). Il a pour effet soit, comme dans le système de Watt, de faire varier la pression de la vapeur avant son entrée dans le cylindre, soit dans les machines actuelles, — à distribution à déclics, par exemple, — d'augmenter ou de diminuer le volume de vapeur admis dans le cylindre à chaque coup de piston.

Fig. 681.

Sur un arbre vertical HDO (fig. 681), tournant avec une vitesse proportionnelle à celle de la machine, sont articulés deux bras OA, OA'

terminés à leur partie inférieure par des boules métalliques BB. Le mouvement de l'arbre de couche est communiqué à cet axe par l'intermédiaire d'une corde sans fin s'enroulant sur une poulie P, fixée à la tige O. A l'état de repos et sous l'influence de la pesanteur, les boules tendent à ramener dans la verticale les deux bras auxquels elles sont fixées, tandis que, dès que l'arbre vertical entre en rotation, elles tendent s'en écarter, par un effet de la force centrifuge, et à prendre une position d'équilibre dépendant de la vitesse.

Pour utiliser cet effort, on réunit, par des bielles articulées en A et A', les deux bras qui portent les boules à une douille CM qui coulissera sur l'arbre vertical suivant que les boules tendront à s'en écarter plus ou moins. Au moyen de tringles et de leviers convenables, on utilise le déplacement de la douille pour actionner soit un papillon étranglant l'arrivée de la vapeur et fonctionnant comme un robinet, dans la machine de Watt, soit pour agir sur les touches de la *distribution à déclic* dans les machines perfectionnées.

743. **Rendement des machines à vapeur.** — On peut calculer le rendement d'une machine à vapeur indépendamment de son système.

1° *Rendement théorique.* — Considérons, par exemple, une machine à condensation, où la vapeur travaille à 5 atmosphères et où le condenseur est maintenu à 40°. La vapeur sort donc de la chaudière à la température de 152°; elle se détend dans le cylindre, où elle perd de la chaleur, en produisant du travail, puis elle se rend au condenseur, où elle est ramenée à l'état d'eau à 40°; puis le cycle recommence indéfiniment. En appliquant le principe de Carnot (729), on a

$$R = \frac{T' - T}{T'} = \frac{273 + 152 - (273 + 40)}{273 + 152} = \frac{112}{425} \cdots = \text{environ } \frac{1}{4}.$$

2° *Rendement pratique.* — Ce rendement théorique, si faible qu'il soit, est un maximum qui n'est jamais atteint dans la pratique. — On peut s'en rendre compte en calculant directement la quantité de chaleur dégagée par le combustible dépensé et en le comparant au travail développé par la machine. 1 kg de houille dégage en brûlant 8000 cal., et 1 cal. équivaut à 425 kgm ; donc 1 kg de houille devrait produire par sa combustion

$$8000 \times 425 = 3\,400\,000 \text{ kgm.}$$

Or 1 cheval-vapeur équivaut à 75 kgm *par seconde*, ou bien

$$\text{à } 75 \times 60 \times 60 = 270\,000 \text{ kgm } \textit{par heure}.$$

Donc, pour produire le travail de 1 cheval-vapeur pendant une heure, faut brûler une quantité de charbon égale à

$$\frac{270\,000}{3\,400\,000} = 0{,}080 \text{ kg.}$$

Or les bonnes machines à vapeur consomment en moyenne 1 kg de charbon

par heure pour produire un cheval-vapeur. Quelques machines de très grande puissance, fonctionnant dans des conditions exceptionnelles, ne consomment que 0,800 kg. Cela fait donc un *rendement pratique* qui varie entre 8 et 9 pour 100, tandis que le *rendement théorique* était de 25 pour 100.

744. Détente de la vapeur. — Machines à simple détente : Système Clapeyron. — Nous avons supposé jusqu'ici que la vapeur de la chaudière travaillait *à pleine pression*, c'est-à-dire qu'elle affluait, avec la pression qu'elle a dans la chaudière, sur chaque face du piston pendant toute la durée de la course. Dans les premières machines de Watt, la vapeur travaillait à pleine pression ; mais Watt lui-même eut l'idée de la faire travailler *avec détente* : la vapeur introduite dans le cylindre pendant une portion seulement de la durée de la course agit d'abord à pleine pression ; mais, à mesure que le piston avance, la vapeur se *détend* en augmentant de volume et sa pression diminue jusqu'à la fin de la course. Il résulte de ce mode d'action d'abord une plus grande régularité dans le mouvement, puis, à égalité de travail, une notable économie de vapeur et, par conséquent, de combustible. Les machines munies d'un système de détente sont dites *machines à simple détente*.

Système Clapeyron. — Parmi les nombreux systèmes de détente qui ont été imaginés, nous citerons comme exemple le système de Clapeyron, qui est très employé, surtout dans les machines à mouvement rapide, telles que les locomotives. La modification porte sur le tiroir, ou plutôt sur les bandes qui recouvrent chaque lumière : on leur donne une largeur qui dépasse le diamètre de la lumière correspondante. Les rebords ab, $a'b'$, cd, $c'd'$ (fig. 682), extérieurs et intérieurs, forment ce qu'on appelle le *recouvrement* du tiroir ; le rôle de ces saillies est de diminuer la durée de l'admission de la vapeur dans le cylindre par chacune des deux lumières. On peut considérer quatre périodes successives dans le fonctionnement du *tiroir à recouvrement* de Clapeyron.

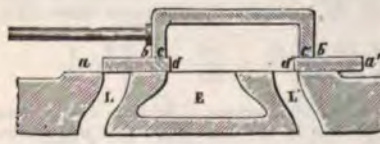


Fig. 682.

1re *période* : il y a *admission de la vapeur*, qui travaille à *pleine pression*, jusqu'à ce que la *lumière d'admission* soit fermée ;

2e *période* : il y a *détente* de la vapeur, qui travaille alors à pression décroissante, jusqu'à ce que la *lumière d'échappement* soit ouverte ;

3e *période* : il y a *échappement* de la vapeur, mais qui cesse par le fait du *recouvrement*, avant que le piston ait atteint le fond du cylindre ;

4e *période* : il y a *compression* du résidu de vapeur par le piston qui la refoule et la comprime avant le début d'une nouvelle période d'admission. La compression termine donc le cycle des mouvements alternatifs du tiroir.

745. **Perfectionnements apportés aux machines à vapeur.** — Le principe de Carnot, qui prouve que le rendement d'un moteur thermique augmente au fur et à mesure que l'écart des températures du gaz ou des vapeurs devient plus grand entre la source chaude et la source froide, a conduit à des modifications importantes dans les machines à vapeur. Au lieu d'employer la vapeur à une pression moyenne de 2 atm, qui correspond à environ 2 kg par cm², comme dans la machine de Watt, on la prit à une température plus élevée, correspondante à une pression de 5 kg; puis, à mesure que l'on a perfectionné la résistance des chaudières, on est arrivé peu à peu à employer couramment des pressions de 12 kg et plus.

On distingue trois classes de machines à vapeur d'après l'élévation de la température, et, par suite, d'après la tension de la vapeur qui est employée.

1° Les machines *à basse pression* (à condenseur), où la tension ne dépasse pas 1 atm ou 2 atm; 2° les machines *à moyenne pression*, où la tension reste comprise entre 3 atm et 5 atm; 3° les machines *à haute pression* (sans condenseur), où la vapeur travaille à une tension supérieure à 5 atm.

746. **Perfectionnements au mécanisme des machines à simple détente.** — On a apporté dans la construction des machines à vapeur à simple détente un grand nombre de perfectionnements, dont nous allons indiquer les principaux.

1° *Réchauffage de la vapeur.* — On entoure le cylindre C (fig. 685), dans lequel la vapeur pousse le piston en se dilatant et en se refroidissant, d'une circulation de vapeur provenant de la chaudière. Cela permet de pousser plus loin la détente de la vapeur, en empêchant qu'elle ne se condense en eau.

2° *Distribution de la vapeur.* — Le tiroir de Watt présentait des inconvénients assez grands. La force nécessaire pour le faire glisser devant les orifices de distribution était assez considérable. En second lieu, les mouvements d'obturation et d'ouverture des orifices d'entrée et de sortie de vapeur se faisant d'une manière lente et progressive, la vapeur se trouvait soumise à des actions de laminage et de friction absorbant en pure perte une partie de sa chaleur. De plus, la vapeur chaude se trouvait refroidie par contact avec la paroi du tiroir. Enfin, et surtout, les canaux de communication entre le tiroir et le cylindre, — dont le volume est forcément assez considérable, — constituaient des *espaces nuisibles*.

On a remédié à ces inconvénients en munissant la machine de quatre tiroirs au lieu d'un seul. On les place tout contre les fonds même du cylindre, de manière à supprimer presque totalement les espaces nuisibles. D'autre part, chaque tiroir ayant sa fonction propre, soit l'introduction, soit l'échappement de la vapeur, le refroidissement de la vapeur motrice par celle qui a déjà travaillé se trouve évité.

3° *Détente variable.* — Dans la machine de Watt on obtenait la régularisation de la vitesse en étranglant plus ou moins l'orifice de la vanne d'arrivée de vapeur au moyen d'une valve appelée *papillon*, commandée par le régulateur. Il en résultait naturellement que le rendement de la machine diminue au fur et

à mesure que le travail qu'on lui demande est plus faible, puisque la pression, et par conséquent la température de la vapeur, diminuent à son entrée dans la machine.

On emploie aujourd'hui un autre moyen de régler la vitesse de la machine : il consiste à faire varier à chaque coup de piston la quantité de vapeur introduite à pleine pression, — proportionnellement à la force à produire : c'est le système à *détente variable*.

Distribution à déclic. — L'ancien tiroir se prête à ce système : il suffit d'en faire varier la course suivant les besoins. Mais on préfère en général employer des *distributeurs* (fig. 685) qui ne sont en réalité que de gros robinets au moyen desquels on ouvre ou l'on ferme le passage de la vapeur par un simple mouvement de rotation. On emploie quatre distributeurs : deux sont chargés tour à tour de mettre les deux extrémités du cylindre en communication avec le condenseur; les deux autres doivent introduire la vapeur au moment et pendant le temps nécessaires seulement.

4° *Double détente. — Système de Woolff.* — L'emploi de la double détente remonte au siècle dernier. Woolff l'adopta tout d'abord pour régulariser la marche des machines. Dans son système la vapeur agissait à pleine pression pendant toute la course d'un piston, puis allait ensuite se détendre dans un second cylindre beaucoup plus grand avant de s'échapper enfin au condenseur.

Chacun des cylindres A, B est muni d'une boîte à vapeur (fig. 684), où se meut un tiroir ordinaire, ainsi que de *lumières* d'admission et d'échappement disposées comme d'ordinaire. La vapeur arrive par l'orifice V et se répand d'abord dans la boîte du cylindre A, puis pénètre de là au-dessous du piston P. Ce piston reçoit alors un mouvement de bas en haut, il refoule la vapeur qui était au-dessus de lui et l'envoie dans le tuyau d'échappement E. Ce tuyau, au lieu de communiquer avec le condenseur, va déboucher dans la boîte à vapeur du

Légende explicative de la figure 685. — A, réservoir rectangulaire dans lequel se répand la vapeur qui arrive par la valve R. A chaque extrémité se trouvent fixés les distributeurs DD qui ouvrent ou ferment le passage de la vapeur dans le cylindre suivant les mouvements que leur impriment les bielles *tt'*; B, réservoir rectangulaire analogue au réservoir A, mais destiné à recevoir la vapeur d'échappement quand il est mis en communication avec les cylindres par les distributeurs D' D'; C, cylindre proprement dit dans lequel se meut le piston. Il est protégé contre le refroidissement extérieur, ainsi que les réservoirs A et B par un revêtement en bois. De plus il est à double paroi, et la vapeur fraîche venant de la chaudière circulant dans cette double enveloppe empêche la condensation de la vapeur qui travaille, pendant sa détente.

E, bielle reliant la tête du piston, qui est guidé par le bâti en fonte de la machine, à la manivelle actionnant l'arbre du volant; F, palier supportant l'arbre de transmission, et relié au bâti; G, bâti en fonte, raboté pour servir de guide à la tête du piston; H, tête de bielle et tige de la pompe à air du condenseur; I, tête de bielle et tige de la pompe alimentaire envoyant dans la chaudière de l'eau chaude prise à la sortie du condenseur; K, excentrique actionnant par l'intermédiaire de la bielle *l* et du bras *m* le plateau *p* de commande de la distribution; L, balancier relié à la crosse du piston par une bielle et articulé autour de l'axe X. Il transmet le mouvement à la pompe à air et à la pompe alimentaire; M, régulateur à force centrifuge; N, volant; O, condenseur; P, vase dans lequel la vapeur arrivant du cylindre rencontre l'eau froide injectée sous forme de pluie; R, robinet-vanne placé à l'arrivée de la vapeur; T, tuyaux mettant le réservoir B en communication avec le condenseur; X, axe autour duquel oscille le balancier.

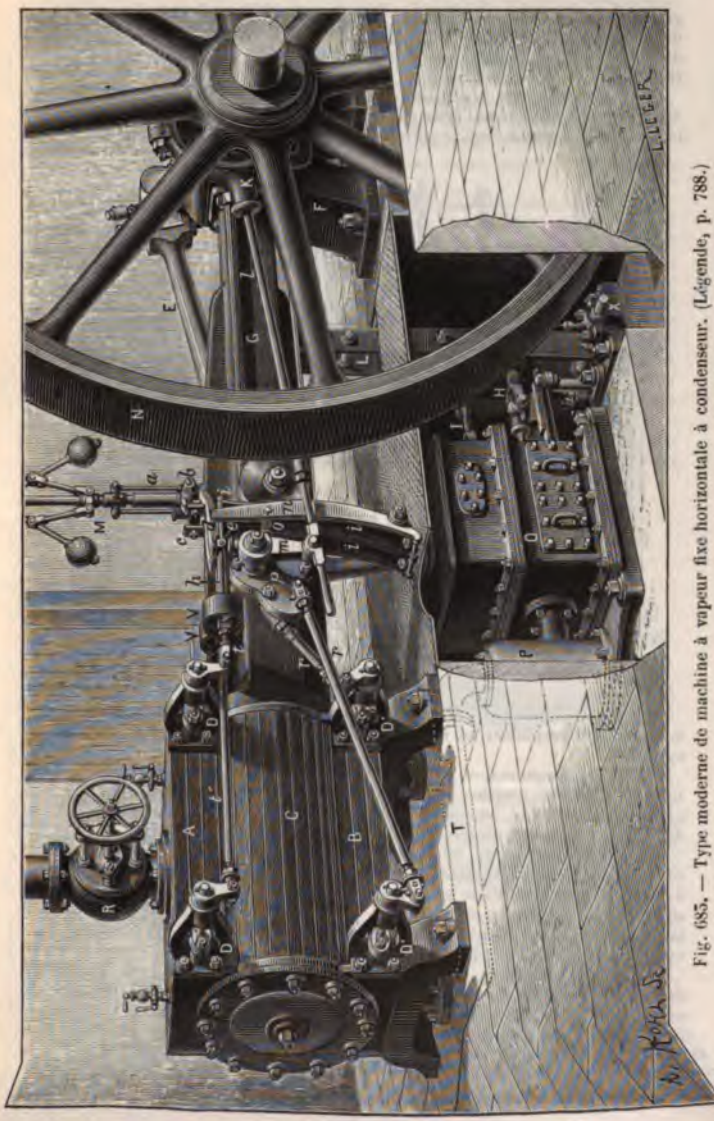


Fig. 685. — Type moderne de machine à vapeur fixe horizontale à condenseur. (Légende, p. 788.)

grand cylindre B. Là elle pénètre par la lumière inférieure d'admission au-dessous du piston P' et, s'y détendant, produit également le mouvement ascendant de ce piston, pendant que la vapeur, qui était au-dessus, s'échappe par le tuyau CC et de là au condenseur.

Ainsi le mouvement simultané des deux tiroirs *en sens inverse* produit le mouvement simultané des deux pistons *dans le même sens* : la vapeur travaillant *à pleine pression* dans le petit cylindre et *avec détente* dans le grand. Les

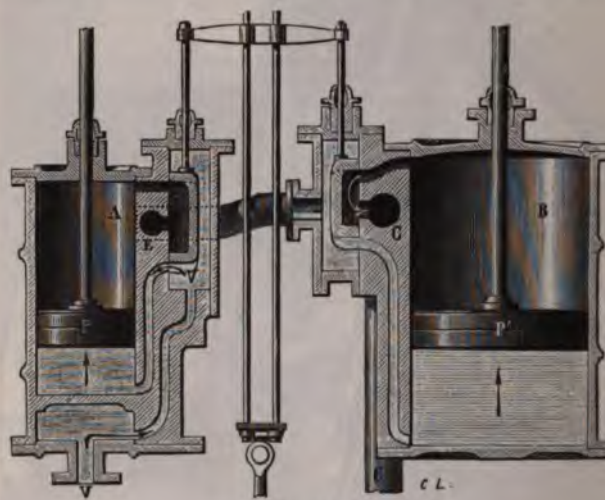


Fig. 684.

machines qui emploient ce mode de détente sont appelées *machines à deux cylindres*.

5° *Système Compound.* — Ce dernier système n'était guère applicable qu'aux machines à basse pression. Quand on fut arrivé à employer couramment des pressions de 5 ou 6 kg, on adopta le système dit *Compound*, qui diffère de celui de Woolff en ce qu'un réservoir de vapeur est interposé entre les deux cylindres.

Ce dispositif permet de caler les manivelles actionnées par chaque cylindre sous l'angle le plus favorable pour obtenir l'effort le plus régulier sur l'arbre de la machine, et il évite ainsi l'obligation de donner aux deux cylindres des mouvements synchrones. On arrive de plus à pousser encore plus loin la détente de la vapeur, en obligeant celle-ci à se détendre déjà dans le premier cylindre, dit *cylindre à haute pression*.

6° *Triple expansion* et *quadruple expansion.* — Afin d'augmenter encore la détente de la vapeur et pour réduire par conséquent au minimum la dépense de combustible, on a créé des types de machines à *triple* et *quadruple* expansion. Ces machines sont munies de trois ou quatre cylindres successifs dans lesquels la vapeur passe successivement. Entre chacun de ces cylindre se trouvent des réservoirs de vapeur analogues à celui qui caractérise la machine Compound.

Remarque. — Il ne faudrait pas croire que les machines à plusieurs détentes

successives soient *toujours* plus économiques, au point de vue de la consommation de vapeur, que les machines à simple expansion.

On peut remarquer en effet que la multiplication des cylindres de détente doit augmenter le frottement du mécanisme et les surfaces de refroidissement. Il y a donc une juste mesure à garder suivant les cas.

L'avantage des machines à double expansion apparaît pour des forces un peu grandes, 400 ou 500 chevaux et plus, si l'on ne dispose pas de pressions de vapeur supérieures à 6 kg. La triple et la quadruple expansion sont applicables pour des pressions de vapeur de 12 à 15 kg et pour les très grandes puissances.

747. **Machine à vapeur horizontale fixe.** — Un grand nombre de ces perfectionnements sont réalisés dans le type moderne de machine à vapeur qui est représenté par la figure 685. Elle est dite *horizontale*, à cause de l'orientation du cylindre C, et *fixe*, parce qu'elle est installée à poste fixe. La tige du piston attaque directement par une bielle E l'arbre à manivelle, ce qui a l'avantage de permettre un assemblage très rigide, et bien moins encombrant, de tous les organes. La simplicité du mécanisme et de nombreux perfectionnements de détail ont permis de réduire beaucoup la consommation de vapeur. Les anciennes machines de Watt consommaient en effet généralement de 16 à 18 kg de vapeur par cheval-heure; or cette machine fixe n'en consomme guère que 8 à 9 kg pour des forces inférieures à 100 chevaux, et *moins encore* pour des puissances plus grandes.

748. **Perfectionnements apportés aux condenseurs.** — Les perfectionnements ont porté également sur le condenseur de la machine de Watt. On emploie

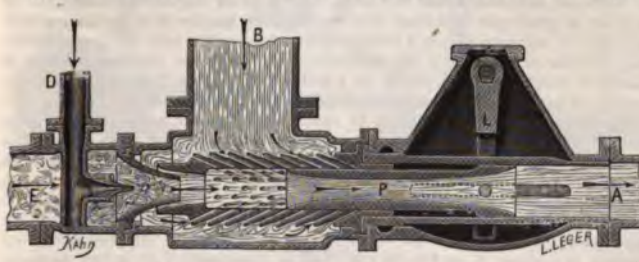


Fig. 685.

aujourd'hui trois types bien distincts de condenseurs : les *condenseurs à mélange*, les *condenseurs à surface*, les *éjecto-condenseurs*.

1° *Condenseurs à mélange.* — Les premiers servent couramment dans les machines où l'eau dont on dispose est propre à l'alimentation des chaudières; on n'a ainsi qu'à renvoyer à la chaudière au moyen d'une pompe une partie de l'eau déjà chaude sortant du condenseur.

2° *Éjecto-condenseurs.* — On commence à employer depuis quelque temps un système de condenseur à mélange (fig. 685) qui est analogue à l'injecteur Giffard. Il est disposé de manière à utiliser l'accélération de vitesse donnée à l'eau par la condensation de la vapeur. Pour amorcer l'appareil, c'est-à-dire pour donner à l'eau froide arrivant en B, et qui doit servir à la condensation, sa première impulsion, on commence par introduire de la vapeur à haute pression par la tubulure D. Une fois la circulation bien établie, la vapeur d'*échappement* arrivant en D continue à entretenir le mouvement, et l'on *supprime l'arrivée de la* vapeur à haute pression.

Le manchon P, qui se déplace dans le tube G par la manœuvre du levier L, sert à augmenter ou à diminuer le nombre des orifices d'injection de l'eau froide, pour proportionner le débit à la quantité de vapeur à condenser.

Ces appareils suppriment, comme on voit, la perte de travail due au fonctionnement de la pompe dans les autres condenseurs.

Condenseurs à surface. — Quand on ne dispose pas d'une réserve d'eau pour alimenter les chaudières, on a le plus grand intérêt à condenser la vapeur d'échappement de la machine, afin de pouvoir utiliser indéfiniment la même eau. Ce cas se présente spécialement dans les *Machines marines*, l'eau de mer étant impropre au service des chaudières.

On emploie alors le *condenseur à surface*, qui n'est à proprement parler qu'une chaudière renversée. Il est en effet composé d'un réservoir métallique dans lequel la vapeur d'échappement est obligée de circuler. Un faisceau de tubes traverse ce récipient, et une pompe entretient une circulation continuelle d'eau froide, puisée à la mer sur les navires, par exemple, à travers les tubes. La vapeur, se trouvant en contact avec des parois froides, se condense en produisant le vide et est renvoyée à la chaudière par la pompe alimentaire.

749. **Machines marines.** — Les machines dites *marines* sont les plus puissantes que l'on construise; leur puissance atteint *plusieurs milliers* de chevaux-vapeur. Elles doivent en outre satisfaire à plusieurs conditions toutes spéciales à cause de leur emploi : en particulier une grande économie de combustible, afin que celui-ci n'absorbe pas une trop grande place dans la cargaison du navire, et aussi une simplicité relative du mécanisme le mettant à l'abri des accidents. Il en résulte que les distributions à déclic ne sont pas adaptées à ces machines, tandis qu'on emploie couramment la triple et la quadruple expansion. D'autre part, les besoins de la navigation exigent que la machine puisse à volonté tourner dans l'un sens ou dans l'autre. Pour obtenir ce résultat, il est nécessaire que l'on puisse modifier pendant la marche le mouvement des tiroirs. On y arrive à l'aide d'un dispositif mécanique appelé *coulisse*, dont le premier modèle est dû à Stephenson.

750. **Coulisse de Stephenson.** — Ce mécanisme (fig. 686) se compose en principe de deux plateaux circulaires et excentriques, accolés et calés sur l'arbre de la machine suivant un angle déterminé. Chacun d'eux est entouré d'un collier en bronze A et A' dans lequel il tourne et il est relié, par une bielle, à l'extrémité de la coulisse proprement dite BB'. La coulisse est suspendue à l'extrémité d'un levier coudé HNP par la tringle PB', et équilibrée par un contrepoids Q. Au moyen du levier MK et de la tige GH, on peut élever ou abaisser la coulisse. Il en résulte que l'axe de commande T de la tige du tiroir restant au même niveau, puisqu'il est fixé à l'extrémité du levier E, le tiroir est commandé tantôt par l'excentrique A, tantôt par l'excentrique A', suivant que la coulisse est abaissée ou élevée. Dans une position intermédiaire et malgré le mouvement des deux excentriques, il est évident que le point F ne se déplacerait pas et par conséquent la distribution de la vapeur n'aurait pas lieu.

Il est nécessaire, bien entendu, dans les machines à expansions multiples, que le sens de la distribution soit changé en même temps dans tous les cylindres.

751. **Machines locomotives.** — Les machines dites *locomotives* sont des machines à vapeur appliquées au transport des voyageurs et des marchandises sur les voies ferrées. Elles doivent, de même que les machines marines, satisfaire à deux conditions principales : 1° facilité du changement de marche permettant de renverser le sens de rotation des roues; 2° grande simplicité de mécanisme. Il en résulte naturellement que l'emploi de la coulisse y est indiqué, de même que les systèmes de distribution très perfectionnés en sont proscrits.

Depuis quelques années on commence à construire des machines locomotives à double expansion, mais elles ne sont pas encore très répandues et la grande majorité est à simple expansion.

Par suite du service tout spécial que doivent remplir ces machines, il ne peut pas être question de les munir d'un condenseur, car la quantité d'eau à transporter pour son alimentation serait trop considérable. D'autre part, pour donner au mouvement de rotation des roues une grande régularité, on emploie deux cylindres dont les bielles attaquent des manivelles calées à 90° sur l'axe des roues. Cette disposition donne en outre l'avantage de supprimer le point mort et de permettre à la machine de démarrer dans quelque position que se trouvent les deux manivelles. En effet l'un des pistons au moins est toujours dans une position favorable pour exercer son effort sur l'une des manivelles.

Fig. 686.

En général les machines locomotives sont constituées par un cadre résistant, construit en tôle de fer, sur lequel est posée la chaudière et supporté par l'intermédiaire de ressorts par un nombre plus ou moins grand d'essieux, suivant le service auquel est destinée la machine, et suivant son poids.

Locomotive à petite vitesse. — La locomotive dite *à petite vitesse* comporte quatre essieux moteurs ayant tous des roues de même diamètre. L'effort de traction de ce type est considérable, mais par contre sa vitesse est réduite. De plus, le mecanisme et les essieux moteurs étant répartis en deux groupes distincts qui peuvent pivoter indépendamment l'un de l'autre autour d'un axe vertical, il en résulte une grande facilité pour le passage dans les courbes de faible rayon. Ce genre de machine convient en conséquence au service des voies de peu de largeur ayant un tracé sinueux et présentant de fortes rampes.

Locomotive à grande vitesse. — La locomotive représentée figure 687 est, tout au contraire, destinée à traîner des charges relativement faibles, mais à de très grandes vitesses et sur des voies sensiblement planes.

Elle est à simple expansion, c'est-à-dire que la vapeur s'échappe directement

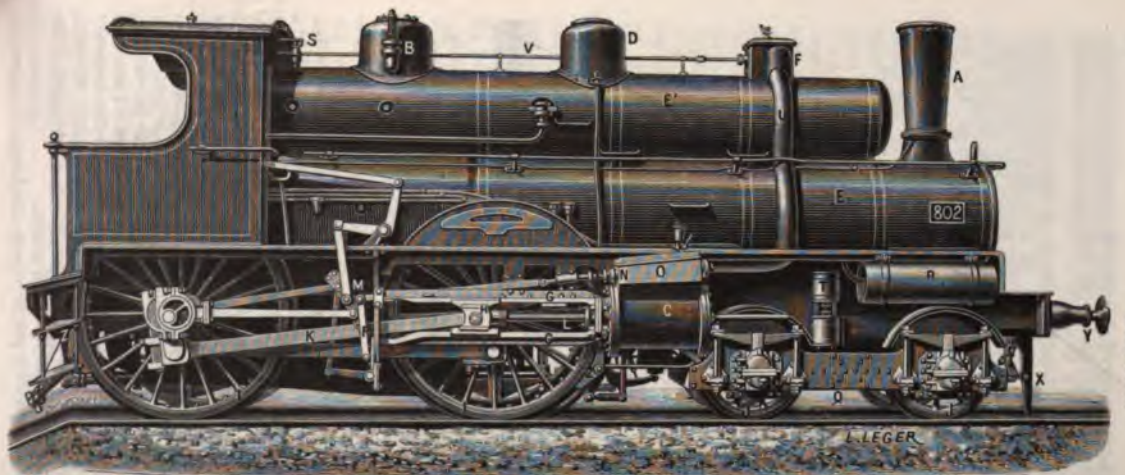


Fig. 687. — Locomotive mixte à grande vitesse (*Chemins de fer de l'Est*).

A, cheminée ; B, soupape de sûreté ; C, cylindre ; D, réservoir à sable ; E, corps de la chaudière ; E', réservoir de vapeur ; F, boîte à vapeur contenant le registre qui ouvre ou ferme la communication de la vapeur de la chaudière avec les cylindres ; G, glissières guides de la crosse du piston ; H, crosse du piston ; I, roues motrices ; J, roues porteuses ; K, bielle ; L, tige du piston ; M, coulisse de Stephenson et mouvement de commande de la distribution ; N, tige du tiroir de distribution ; O, boîte du tiroir de distribution ; P, bielle d'accouplement des roues motrices ; Q, avant-train articulé ou boggie ; R, réservoir d'air comprimé pour la commande des freins automatiques ; S, sifflet ; T, pompe de compression d'air à vapeur pour le service des freins automatiques ; U, tuyau amenant la vapeur de la chaudière aux cylindres V, tige de commande du registre de vapeur ; X, chasse-pierres ; Y, tampon de choc à ressort ; Z, sabot de frein.

dans l'atmosphère, après avoir travaillé dans les deux cylindres placés symétriquement de chaque côté du bâti, au lieu de se détendre dans des cylindres à basse pression comme dans la machine précédente, qui comporte deux cylindres à haute pression et deux cylindres à basse pression.

Comme on le voit sur la figure, deux essieux seulement sont moteurs et comportent des roues de très grand diamètre. On peut, en conséquence, obtenir avec ces machines des vitesses de 100 kilomètres à l'heure.

752. **Locomobiles.** — A côté des trois types de machines à va-

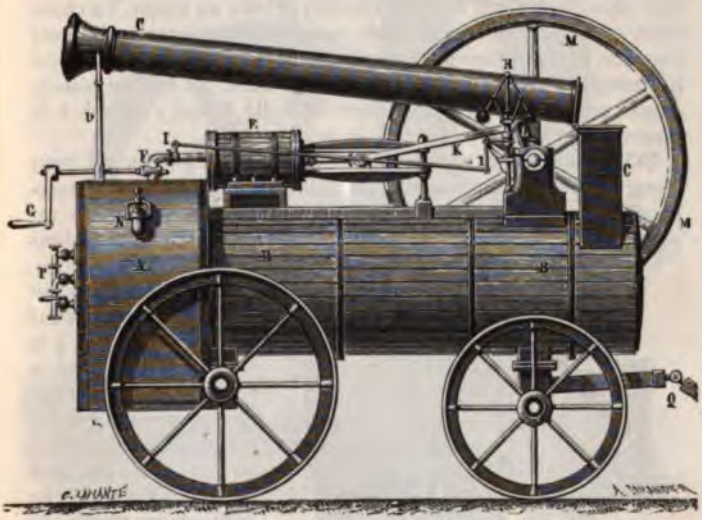


Fig. 688. — *Locomobile Calla* : A, BB, boîte à feu et corps cylindrique tubulaire; C, cheminée; E, cylindre; M, volant; K, L, bielle et manivelle; H, H, régulateurs.

peur que nous avons étudiés, machines fixes, machines marines et locomotives, il existe un type intermédiaire très important par la multiplicité de ses applications : ce sont les *locomobiles*.

Le nom de *machine fixe* caractérise bien les moteurs à vapeur de la grande industrie (fig. 684) qui sont installés à poste fixe et qui s'usent au lieu même où ils ont travaillé. Le nom de *locomotive* indique aussi nettement la fonction de la machine à vapeur des chemins de fer, laquelle emploie sa puissance à se mouvoir elle-même tout en remorquant à sa suite un convoi plus ou moins lourd. La *machine marine* tient à la fois des deux premiers types; car, d'une part, elle est installée à demeure sur le navire

navire qui la porte, et, d'autre part, elle n'entraîne celui-ci qu'en se mouvant elle-même.

La *locomobile* (fig. 688) est un type intermédiaire qui ne ressemble à la locomotive que par le nom et l'apparence extérieure. En somme, c'est une machine fixe, mais qui est transportable. Elle est disposée, comme la locomotive, sur un châssis et montée sur des roues, mais qui ne sont pas des roues motrices : elles servent seulement à la locomotion de la machine sur les routes ou à travers champs, à l'aide de deux chevaux attelés au limon. La chaudière est une chaudière tubulaire, composée d'un foyer A, situé sur l'arrière, et du cylindre BB renfermant les tubes. Ce cylindre est horizontal et placé au-dessus de la chaudière. La tige du piston, guidée par une glissière, actionne la bielle K, qui s'articule à la manivelle de l'arbre moteur et du volant.

753. Machines à air chaud. — 1° *Principe.* — On ne peut élever la température maximum de la vapeur d'eau ni en conséquence augmenter le coefficient économique des moteurs à vapeur par suite des difficultés qu'entraînent les hautes pressions qu'il faudrait atteindre. Cet inconvénient serait évidemment supprimé si l'on substituait à la vapeur d'eau, dont la tension croît si rapidement avec la température, de l'air chaud ou tout autre gaz dont la force élastique ne croît qu'en raison directe du binôme

$$(1 + \alpha T).$$

C'est cette considération qui a conduit à la construction des moteurs à *air chaud*.

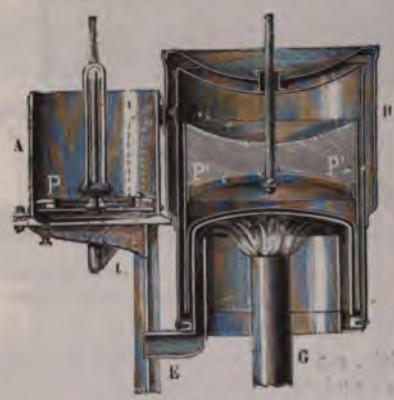


Fig. 689.

2° *Machine Lobereau.* — L'un des plus simples parmi ces moteurs est la petite machine Lobereau, qui est à simple effet, comme la machine à vapeur primitive de Newcomen.

Description et fonctionnement. — Imaginons deux cylindres A et B de diamètres assez différents (fig. 689). Le plus petit A communique par le fond supérieur avec l'atmosphère, et par une tubulure H avec le cylindre B. C'est lui qui constitue le corps de pompe où se meut le piston P. L'autre cylindre B sert *à la fois* de chaudière et de distributeur. C'est là en effet que la masse d'air exposée à l'action d'un bec de gaz b s'échauffe, se dilate, et en passant par les

conduits *tt*, sous le piston *P* le soulève jusqu'au haut de sa course. A ce moment une masse de plâtre PP', en forme de piston, s'abaisse dans le cylindre B. Cette masse fonctionne comme un tiroir pour déplacer l'air chaud et le chasser dans le haut du cylindre B par les interstices qu'elle laisse entre sa surface exté-

Fig. 690. — Moteur à air chaud (*système Bénier*).

A, bâti en fonte supportant tout le mécanisme; B, balancier recevant l'effort du piston moteur; B', Balancier transmettant l'effort de la manivelle à la pompe foulante à air; C, colonne en fonte supportant le balancier; D, cylindre en fonte ouvert à sa partie supérieure : la partie inférieure D' est à double paroi et permet une circulation d'eau destinée à empêcher un trop grand échauffement; E, obturateur du fond du cylindre par lequel on retire les cendres et les scories accumulées pendant la marche. Au-dessus de cet obturateur se trouve la grille sur laquelle est brûlé le coke, dans l'intérieur même du cylindre; F, tête de la bielle du piston moteur; F', bielle transmettant le mouvement du balancier à la manivelle; F'', bielle renvoyant le mouvement de la manivelle au balancier B'; F''', bielle actionnant la pompe à air; G, mécanisme comprenant un obturateur à glissement de forme spéciale qui permet d'introduire peu à peu le combustible dans le cylindre pendant le fonctionnement; H, tiroir de *distribution* commandé par la came d'un levier articulé I, *et rappelé en arrière par les* ressorts S, S. Il introduit aux moments convena-

rieure et la paroi interne du cylindre. L'air est alors refroidi à la fois par l'interposition d'un corps mauvais conducteur entre lui et la source de chaleur, et par un courant d'eau froide qui circule autour de lui. Sa force élastique diminue au point de ne plus faire équilibre à la pression atmosphérique qui s'exerce au-dessus du piston P. Celui-ci retombe alors jusqu'au bas de sa course. En même temps la masse PP' remonte, l'air est de nouveau exposé à l'action de la chaleur du bec de gaz, et le mouvement de va-et-vient continue. Il est facilité et régularisé par un volant que l'on tourne à la main pour la mise en marche.

3° *Moteurs à air chaud.* — Ils se composent (fig. 690) d'une pompe à air horizontale mue par une bielle, qui aspire l'air extérieur et le refoule sous la grille d'un foyer hermétiquement clos.

L'air, en traversant le coke incandescent qui recouvre la grille, se dilate et repousse le piston moteur vertical qui se trouve placé au-dessus du foyer même. Quand le piston moteur est arrivé en haut de sa course, l'air dilaté s'échappe dans une cheminée à travers une soupape qui fonctionne sous l'action d'une came.

Le volant emmagasine l'énergie produite par le mouvement ascendant du piston moteur et une partie est employée à actionner la pompe foulante à air. Un régulateur à force centrifuge augmente ou diminue la quantité d'air refoulé par cette pompe sous le foyer, suivant la puissance que l'on demande au moteur pour conserver la vitesse constante.

On remarquera que, dans ce système, ce n'est pas constamment le même air réchauffé et refroidi qui sert de moteur : l'air chaud qui s'échappe après avoir agi sur le piston possède encore une énorme quantité de chaleur non utilisée; cependant on arrive, malgré ces pertes considérables, à une meilleure utilisation du combustible que dans les machines à vapeur, puisque la consommation n'est pas supérieure à 600 grammes de coke par cheval et par heure. Pour éviter la dissociation des huiles de graissage, on emploie généralement des produits tirés de la distillation du pétrole.

754. **Moteurs à gaz.** — On a cherché à utiliser l'énergie produite par la déflagration d'un mélange de gaz combustible et d'air pour faire mouvoir des machines.

Ces moteurs sont dits *à explosion*, mais en réaltié le principe de leur fonctionnement est analogue à celui des moteurs à air chaud. La combustion du gaz a pour résultat, en effet, de dilater l'air, comme le fait dans le moteur décrit plus haut son passage à travers le coke incandescent.

La majorité des moteurs à gaz actuellement employés sont du système *à demi-simple effet*, qui fonctionne suivant un *cycle à quatre temps*.

La figure 691 représente un de ces moteurs à gaz.

Un piston relié à la manivelle de l'arbre moteur qui porte le volant se meut dans un cylindre fermé à sa partie postérieure seulement.

bles l'air refoulé par la pompe à air sous la grille du foyer dans le cylindre moteur; I, came commandant le tiroir de distribution; K, robinet permettant de faire passer une petite quantité de l'air refoulé par la pompe au-dessus du foyer, afin de rabattre les cendres et d'empêcher l'encrassement du cylindre; L, poulie motrice; M, manivelle; O, robinet commandé par le régulateur et réglant la quantité d'air introduite sous le foyer à chaque coup de pompe, proportionnellement à l'effort demandé à la machine; P, pompe à air; R, régulateur à force centrifuge; S, S', ressorts de rappel; T, tringles transmettant les oscillations du régulateur au robinet O; V, volant. Une seconde came, analogue à celle qu'on voit dans le dessin, mais placée du côté du volant, soulève au moment convenable une soupape par où s'échappe dans un tuyau, puis à l'extérieur, l'air dilaté qui vient de repousser le piston.

1er Temps. — Supposons le piston à la position extrême de sa course, près du fond du cylindre, et, à l'aide d'une puissance mécanique auxiliaire, faisons tourner l'arbre moteur. — Le piston se déplace et produit le vide derrière lui. Un tiroir distributeur T, commandé par un contre-arbre, ouvre alors deux orifices dont l'un communique avec l'air extérieur, et l'autre avec un réservoir de gaz d'éclairage. Les sections des canaux adducteurs du gaz et de l'air étant bien réglées, le mélange qui remplit le cylindre, pendant toute la course en avant du piston est donc un mélange détonant.

2e Temps. — Arrivé au bout de sa course, l'arbre moteur continuant à tourner, le piston revient sur lui-même. Mais à ce moment le tiroir ferme les orifices d'air et de gaz, de sorte que le mélange détonant se comprime de plus en plus jusqu'au moment où le piston, étant revenu tout à fait au bout de sa course arrière, il n'occupe plus qu'une chambre de petite dimension ménagée entre le piston et le fond du cylindre.

3e Temps. — Au moment où la manivelle de l'arbre moteur dépasse le point mort, un contact électrique met en action une bobine d'induction, et une étincelle électrique jaillit entre les pointes de deux fils de platine, qui pénétrent dans l'intérieur du cylindre, isolés dans la masse d'une bougie en porcelaine.

Le mélange enflammé par l'étincelle se dilate et repousse le piston, qui transmet l'énergie au volant par la bielle et l'arbre.

4e Temps. — Arrivé au bout de sa course avant, le piston revient sur lui-même, et une came agit sur un levier qui soulève une soupape par laquelle les gaz brûlés s'échappent dans l'atmosphère par un tuyau.

Remarques. — 1° On voit que c'est pendant le troisième temps seulement que le moteur produit de l'énergie. Il faut donc qu'il soit muni de volants très lourds pour emmagasiner, et en même temps égaliser, les efforts.

2° La compression du mélange gazeux pendant le deuxième temps a pour but d'augmenter son inflammabilité. Il résulte de là que l'on peut employer des mélanges gazeux pauvres en gaz combustible, et par conséquent économiques. Depuis quelque temps même on emploie des moteurs utilisant les gaz produits par la dissociation de la vapeur d'eau mélangée d'air traversant du coke incandescent. Ces gaz sont dits *gaz à l'eau* ou *gaz pauvres*.

3° Au point de vue de l'utilisation du combustible, les moteurs à gaz fonctionnant au moyen des gaz pauvres sont, du moins pour le moment, de tous les moteurs thermiques ceux dont le rendement est le plus élevé. En effet, pour des puissances de 150 ou 200 chevaux-vapeur on arrive à ne pas dépenser plus de 500 grammes de combustible par cheval et par heure.

4° Pour combattre l'échauffement du cylindre sous l'influence de la combustion du gaz, on l'entoure d'une double paroi dans laquelle on fait circuler un courant d'eau.

755. Évaluation du travail fourni par les moteurs thermiques. — Il existe deux catégories d'appareils qui permettent d'évaluer la puissance développée par les moteurs : ce sont les *freins* et les *indicateurs*.

Les freins ont pour fonction d'absorber l'énergie disponible du moteur, en permettant simultanément la mesure de cette énergie. Le plus connu et le plus simple de ces freins est celui de Prony, que nous décrirons seul.

Un autre genre d'appareils, — dont le premier et le type fut l'indicateur de Watt, — permet d'évaluer la puissance des moteurs qui utilisent la détente des gaz et des vapeurs. L'énergie d'un moteur de ce genre peut être facilement calculée au moyen des données suivantes :

1° Volume engendré par seconde par le piston se déplaçant dans le cylindre ;

2° Pression moyennne de la vapeur (air ou gaz chaud) agissant sur le cylindre.

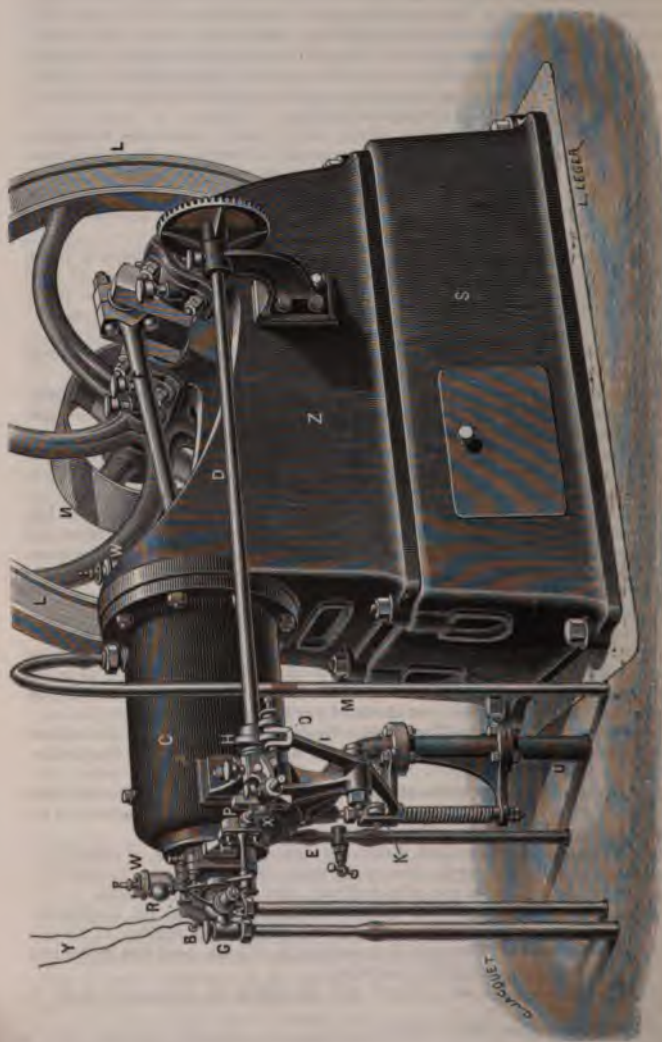


Fig. 691. — Moteur à gaz (système simple).

L'expression de la puissance (en kgm par seconde) développée par le moteur est, en effet, représentée par la relation

$$W = nSCH,$$

dans laquelle S est la surface du piston en mètres carrés, C la course en mètres du piston en une seconde, H la pression moyenne en kilogrammes du fluide sur le piston pendant son déplacement, et n le nombre de tours par seconde.

LÉGENDE EXPLICATIVE DE LA FIGURE 691.

A, tuyau par lequel est aspiré l'air extérieur pendant le premier temps; B, borne en cuivre fixée sur une bougie isolante en porcelaine qui pénètre par un joint hermétique à l'intérieur d'une chambre ménagée dans le tiroir et est traversée en son centre par deux fils de platine isolés : l'un d'eux est soudé par un bout à la borne et s'approche par l'autre extrémité à une très faible distance du bout du second fil de platine qui communique de son côté à la masse même du moteur. Par conséquent, le courant d'une bobine de Ruhmkorff étant lancé par la borne B, une étincelle éclateradans l'intérieur même de la chambre du tiroir entre les deux fils de platine, le courant revenant à la bobine d'induction par la masse du moteur et le deuxième fil; C, cylindre à double paroi entre lesquelles circule un courant d'eau froide pour empêcher un échauffement exagéré. Ce cylindre est ouvert à son extrémité antérieure, la bielle F étant articulée directement sur le piston : on donne à celui-ci une longueur assez grande par rapport à son diamètre pour qu'il se guide facilement lui-même pendant sa course. Le fond du cylindre est percé d'une lumière devant laquelle se meut le tiroir; D, arbre de commande du tiroir et de la soupape d'échappement; il ne fait qu'un tour pour deux révolutions de l'arbre du volant. Il est commandé par l'arbre de la machine au moyen de deux engrenages; E, tuyau muni d'un robinet amenant l'eau nécessaire au refroidissement du cylindre; F, bielle transmettant les mouvements du piston à la manivelle; G, robinet réglant l'arrivée du gaz; H, came agissant une fois par tour de l'arbre D sur la molette O et le levier I pour soulever la soupape d'échappement des gaz brûlés; I, levier transmettant les mouvements de la came H; K, chape portant un galet sur lequel agit un levier I en tendant le ressort à boudin pour repousser la tige de la soupape d'échappement; L, volant régularisant la marche du moteur; M, tuyau d'évacuation de l'eau de refroidissement; N, poulie; O, galet adoucissant le frottement de la came H; P, glissière reliée au tiroir et l'entraînant dans son mouvement de va-et-vient sous l'effort du mouvement du bouton de manivelle X; R, régulateur pendule, composé d'une tige portant à ses deux extrémités des masses d'un moment à peu près égal, de façon que ces oscillations soient relativement lentes malgré le peu de longueur du rayon. L'extrémité inférieure de la tige porte un cran qui accroche ou échappe un ergot porté par une tige fixée au tiroir et participant à son mouvement, suivant que le mouvement du tiroir est plus rapide ou plus lent que celui du pendule. Quand la vitesse du moteur diminue par suite du travail demandé à la machine, l'ergot repousse la tige d'une soupape qui ferme l'arrivée du gaz et permet par conséquent au mélange gazeux de se produire et de détoner ensuite en temps opportun. Au contraire, quand la vitesse est trop grande, l'ergot n'accroche plus la tige de la soupape : l'aspiration du gaz ne pouvant plus se faire, les explosions n'ont plus lieu et la vitesse se ralentit; S, socle en fonte supportant le moteur; T, tiroir de distribution; U, tuyau d'échappement des gaz brûlés; X, bouton d'une manivelle fixée à l'extrémité de l'arbre D; Y, fils amenant le courant de la bobine d'induction; Z, bâti du moteur; W, *graisseurs*.

Les valeurs de S et de C sont des données de construction de la machine; n s'obtient en comptant le nombre de tours pendant une minute et en divisant par 60. C'est pour obtenir H qu'on emploie les indicateurs.

756. **Frein de Prony.** — Soit (fig. 692) l'arbre de couche d'un moteur quelconque dont on veut évaluer la puissance. Sur cet arbre on fixe une poulie H, parfaitement centrée, autour de laquelle on place une sorte de collier C, qui est muni intérieurement de cales en bois b et porte un bras de levier terminé par un arc de cercle concentrique à l'axe de la poulie. Il résulte de là que la longueur efficace du levier est L. Les écrous e, e_1 permettent de serrer plus ou moins le collier autour de la poulie H. Un contrepoids D, opposé au levier, l'équilibre parfaitement, ainsi que le plateau H suspendu au crochet, de telle façon que, l'arbre A étant au repos, le levier puisse se placer entre les deux taquets T et T_1 qui limitent ses mouvements.

La machine étant mise en marche dans le sens de la flèche, on comprend immédiatement que le levier va être entraîné contre le taquet T si le collier C est serré autour de la poulie.

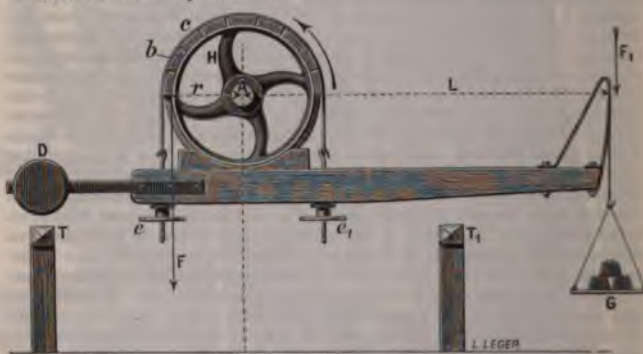


Fig. 692.

En réglant convenablement le serrage des écrous e, e_1, — ce qui diminue ou augmente naturellement le travail absorbé par le frein, — on arrive à conserver au moteur sa vitesse de régime, autrement dit la vitesse à laquelle il doit fonctionner en service normal.

Au moyen de poids marqués que l'on place sur le plateau G, on ramène alors le levier dans sa position primitive, intermédiaire entre les deux taquets.

A ce moment l'effort du moteur sera donc exactement contre-balancé par l'action du poids à l'extrémité du levier.

Nous pouvons en effet admettre que le travail de frottement de la poulie dans le frein agit comme une force F verticale, tangente à la poulie à l'extrémité du rayon r, tandis que les poids agissant sur le crochet C représentent une force F_1, également verticale, mais dirigée en sens contraire.

Le frein étant bien réglé et le levier L en équilibre entre les deux taquets T et T_1, il est évident que le moment de la force F est égal au moment de la *force* F_1; ce dernier étant égal à PL, nous en tirons $Fr = PL$.

Le travail étant égal au produit de l'effort par le chemin parcouru, son expression sera, dans le cas qui nous occupe,

$$W = F \times 2\pi r n.$$

Il nous suffit de remplacer Fr par sa valeur, et nous avons enfin pour expression du travail

$$W = PL2\pi n.$$

Remarque. — Le frein donne des résultats exacts, mais c'est un appareil d'absorption et, par conséquent, il ne permet pas de se rendre un compte exact du travail fourni réellement par un moteur quand celui-ci est employé dans une usine, par exemple.

757. **Indicateur de pression.** — L'indicateur employé aujourd'hui n'a qu'une analogie lointaine avec celui qu'avait imaginé Watt. Il se compose principalement d'un cylindre en bronze dans lequel peut se mouvoir un piston P (fig. 693), fixé à un ressort R. L'appareil est adapté au fond du cylindre de la machine à essayer et communique avec l'intérieur par l'intermédiaire du robinet D. La tige du piston est articulée à l'une des branches d'un parallélogramme qui a pour fonction de diriger le crayon C en ligne droite, tout en amplifiant environ 5 fois les mouvements du piston.

Fig. 693.

Devant la pointe du crayon C est placé un manchon M sur lequel on enroule une feuille de papier. Une cordelette, enroulée au bas du manchon, va se rattacher, au moyen de renvois convenables par poulies, à la tête du piston de la machine. Un ressort intérieur au manchon tend à le ramener toujours dans la position indiquée sur la figure : il en résulte que le mouvement du piston moteur est transmis au manchon et lui imprime un mouvement alternatif égal à 2/3 de circonférence environ.

Le robinet D étant fermé et la machine à essayer étant en marche, le crayon C trace sur le manchon un trait horizontal qui représente la ligne de pression atmosphérique.

Si l'on ouvre alors le robinet D, la pression se transmet au piston de l'indicateur qui comprime le ressort proportionnellement à cette pression, en déplaçant en même temps le crayon sur le manchon.

Les mouvements du crayon C, proportionnels à la pression du fluide moteur, étant parallèles à une génératrice du manchon M, tandis que les mouvements du piston de la machine produisent un mouvement de rotation dont le sens est perpendiculaire, il en résulte que la pointe du crayon tracera une courbe fermée sur la feuille de papier.

Un point quelconque de la courbe tracée par l'indicateur représente à la

fois la position du piston à l'intérieur du cylindre et la pression du fluide qui agissait sur lui à un moment donné. Donc l'aire circonscrite par la courbe f, f_1, g_1, g représente le travail développé sur la face du piston pendant un tour de la machine.

On peut évaluer la surface du diagramme soit en se servant d'un instrument appelé *planimètre*, soit par un procédé géométrique.

Remarques. — 1° Il n'a été question que de ce qui se passe sur une des faces du piston; le fluide moteur agissant tour à tour sur les deux faces dans la plupart des machines, il est nécessaire de faire un diagramme de chaque côté du cylindre. C'est alors la somme des puissances calculées sur les deux faces qui représente la puissance de la machine.

2° *Travail indiqué.* — On appelle *travail indiqué* le résultat obtenu par le calcul des diagrammes. Or il est évident que la puissance utilisable de la machine lui est inférieure. Le frottement des organes, le travail nécessaire pour faire fonctionner les condenseurs, tiroirs, pompes, etc., est assez considérable et très variable du reste suivant le type des machines. Il dépasse souvent 10 0/0, même dans les bonnes machines à vapeur. On peut évaluer le travail perdu pour vaincre ces résistances passives en comparant des résultats fournis par le frein Prony au travail indiqué par les diagrammes. La différence représente la perte de puissance produite par le fonctionnement même de la machine.

LIVRE IX

MAGNÉTISME

CHAPITRE PREMIER

PROPRIÉTÉS DES AIMANTS.

758. **Aimants naturels, aimants artificiels : définitions.** — On nomme *aimants* des substances qui ont la propriété d'attirer le fer et quelques autres métaux, tels que le nickel, le cobalt, le manganèse et le chrome.

On distingue l'aimant naturel et les aimants artificiels. L'*aimant naturel*, ou *pierre d'aimant*, est un oxyde de fer désigné en chimie sous le nom d'*oxyde salin* ou d'*oxyde magnétique de fer*[1], et représenté par la formule Fe^3O^4. Les *aimants artificiels* sont des barreaux, ou des aiguilles d'acier trempé, qui possèdent les mêmes propriétés générales que les aimants naturels : on les leur a communiquées artificiellement par des procédés spéciaux (792).

Le pouvoir attractif des aimants s'exerce à toutes les distances et à travers tous les corps; il décroît très vite quand la distance augmente. Il diminue également à mesure qu'on élève leur température et reprend à peu près sa valeur initiale quand on les refroidit au degré primitif, *pourvu qu'on n'ait pas dépassé une certaine limite*[2].

On désigne sous le nom de *magnétisme* la cause inconnue de cette propriété. On appelle aussi *Magnétisme* la partie de la physique qui comprend l'étude des aimants[3].

1. C'est un minerai de fer, très abondant dans les terrains anciens, principalement en Suède et en Norvège. Toutefois, parmi les échantillons d'oxyde de fer dit magnétique, une faible proportion est douée de la propriété magnétique.

2. En effet, *à la température du rouge*, toute aimantation est complètement et définitivement anéantie.

3. C'est là le magnétisme proprement dit, qui n'a rien de commun avec le *mesmérisme*, improprement appelé *magnétisme animal*.

759. **Pôles et ligne neutre. — Points conséquents.** — Les aimants ne possèdent pas en tous leurs points la même force attractive. En effet, si l'on roule un barreau aimanté dans de la limaille de fer, on en voit une grande quantité adhérer vers les extrémités sous la forme de houppes hérissées (fig. 694); mais l'adhérence de la limaille décroît rapidement à mesure qu'on s'éloigne des extrémités, jusqu'à la partie médiane du barreau, où elle est nulle. La région de l'aimant où la force magnétique est insensible a reçu le nom de *ligne neutre*, et les deux régions

Fig. 694.

voisines des extrémités, où se manifeste le maximum d'attraction, se nomment *pôles*.

Tout aimant, naturel ou artificiel, présente deux pôles et une ligne neutre; toutefois, dans l'aimantation des barreaux, il se produit parfois des pôles contraires alternés entre les pôles extrêmes. C'est ce qu'on appelle des *pôles secondaires* ou *points conséquents*. Tantôt ils sont en nombre pair, tantôt en nombre impair. Nous supposerons toujours que les aimants n'ont que deux pôles : c'est ce qui arrive ordinairement lorsqu'on a soumis aux procédés usuels d'aimantation des masses d'acier ayant la forme, soit de barreaux prismatiques, soit de tiges cylindriques.

760. **Aiguilles aimantées.** — On donne aussi fréquemment aux aimants la forme de lames minces, découpées en losanges très allongés : on les appelle alors *aiguilles aimantées* (fig. 696). Une aiguille aimantée est destinée à servir d'aimant mobile; aussi porte-t-elle, en général, en son centre de gravité, une petite cavité garnie d'une chape, par où on peut la poser et la faire osciller sur un pivot vertical ou horizontal.

761. **Distinction des pôles.** — Si l'on pose une aiguille aimantée sur un pivot vertical et qu'on l'abandonne à elle-même, on la voit, après une série d'oscillations, se fixer dans une position *d'équilibre* qui paraîtra invariable (fig. 695). Si on l'écarte de cette *position*, elle y reviendra d'elle-même et ce sera toujours la *même* extrémité de l'aiguille qui se dirigera vers le même point.

de l'horizon. L'une se tourne sensiblement vers le pôle Nord géographique, et l'autre vers le pôle Sud.

Quelle que soit la cause de cette orientation constante, elle suffit pour distinguer nettement les pôles l'un de l'autre. On est convenu, dans les dessins, de désigner le premier pôle par les lettres A ou *a* ou mieux N, et le deuxième pôle par les lettres B ou *b* ou mieux S. On appellera pôles *de même nom* ceux qui sont désignés par la même lettre dans des aiguilles différentes. Ils jouissent des mêmes propriétés.

762. **Actions mutuelles des pôles.** — Les deux pôles d'un aimant paraissent identiques entre eux quand on les présente à la limaille de fer; mais qu'on suspende une aiguille aimantée *ab*

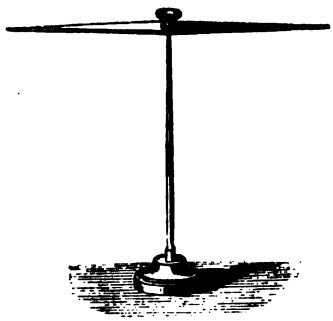


Fig. 695.

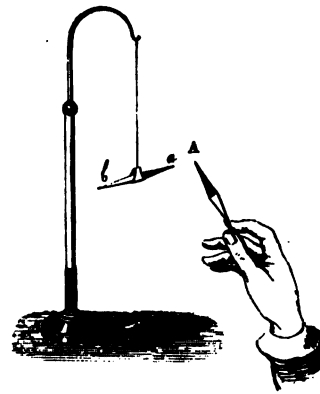


Fig. 696.

(fig. 696) à un fil fin, et qu'on approche de son pôle *a* le pôle A d'une autre aiguille, on remarque une vive répulsion; qu'on approche, au contraire, le même pôle A du pôle *b* de l'aiguille mobile, il se produit une forte attraction. Donc les pôles *a* et *b* ne sont pas identiques, puisque l'un est repoussé et l'autre attiré par le même pôle A de l'aimant fixe. De même le pôle B produit deux actions contraires dans les pôles *a* et *b*, mais en sens inverse. Avec l'un il y a répulsion, et attraction avec l'autre. On en conclut que les actions réciproques entre deux aimants sont soumises à cette loi : *Les pôles de même nom se repoussent, et les pôles de noms contraires s'attirent.*

Si l'on assimile la terre (comme le fit Gilbert) à un immense

aimant dont les pôles magnétiques seraient situés respectivement dans le voisinage des pôles géographiques, en vertu de la loi précédente c'est le pôle austral de l'aiguille qui doit se tourner vers le pôle Boréal ou pôle Nord terrestre, et, au contraire, le pôle boréal de l'aiguille vers le pôle Austral ou pôle Sud terrestre. De là viennent les doubles noms (contradictoires en apparence) de pôle *Nord* ou *Austral* et de pôle *Sud* ou *Boréal*, qu'on donnait autrefois aux deux pôles d'un aimant[1].

Dans les aiguilles aimantées le pôle Nord est généralement coloré en *bleu* (par un léger recuit).

763. **Théorie du magnétisme.** — 1° *Hypothèse d'Ampère.* — Ampère a donné une théorie du magnétisme fondée sur les propriétés des courants électriques. Elle est exclusivement adoptée aujourd'hui. Nous l'exposerons plus loin, après les phénomènes électriques dont elle est la conséquence.

2° *Hypothèse de deux fluides magnétiques.* — On a longtemps admis une autre hypothèse, dite des *fluides magnétiques* : elle n'a plus qu'un intérêt historique. On admettait deux fluides impondérables, agissant chacun par répulsion sur lui-même et par attraction sur l'autre; on désignait ces fluides sous les noms, l'un de *fluide austral*, l'autre de *fluide boréal*, d'après ceux des pôles d'aimant où leurs actions sont prépondérantes.

Les deux fluides se développeraient simultanément, en quantités équivalentes; mais ils ne pourraient être séparés. Un aimant a toujours deux pôles et il porte toujours les deux fluides apparents.

3° *Expérience des aimants brisés.* — L'expérience des *aimants*

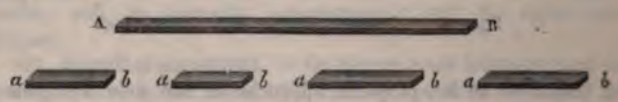


Fig. 697.

brisés démontre que chaque particule d'un corps aimanté est un véritable aimant ayant deux pôles. En effet, si l'on prend une aiguille d'acier ayant deux pôles séparés par une ligne neutre et qu'on la brise en son milieu, chaque moitié d'aiguille est un aimant complet comme l'aiguille entière (fig. 697). Si l'on brise de même ces nouveaux aimants en deux parties, on trouve

1. Aujourd'hui on emploie exclusivement les dénominations de pôle Nord et de pôle Sud.

encore que chacune d'ellee est un aimant complet; et ainsi de suite, aussi loin qu'on peut pousser la division.

4° *Constitution des aimants.* — Tout aimant peut donc être considéré comme constitué par une infinité d'aimants infiniment petits ou *éléments magnétiques.*

On peut concevoir plusieurs modes de groupement de ces éléments *identiques.*

Si on les suppose groupés de manière que leurs lignes des pôles soient orientées parallèlement, on a un aimant, *uniformément aimanté.*

Si on les réunit bout à bout par les pôles de noms contraires et suivant une ligne quelconque, on constitue un *filet magnétique solénoïdal.*

Enfin, si on les suppose implantés normalement à une surface quelconque, de manière que leurs pôles de même nom forment une surface continue, on constitue un *feuillet magnétique.*

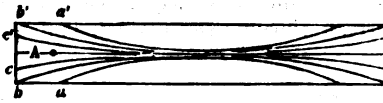


Fig. 698.

5° *Théorie de Jamin.* — Les expériences de Jamin sur le magnétisme l'on conduit à considérer les aimants comme constitués par des filets solénoïdaux, qui, parallèles dans la région neutre, s'épanouiraient sur leurs extrémités pour aboutir aux divers points de la surface (fig. 698). Sur chaque élément superficiel la quantité de magnétisme libre serait proportionnelle aux nombres des pôles qui s'y trouvent.

764. **Force coercitive.** — On nomme *force coercitive* la cause plus ou moins intense qui s'oppose soit à l'aimantation des substances magnétiques, soit à leur désaimantation. Cette force paraît être nulle dans le fer doux, puisque ce métal s'aimante instantanément par l'influence d'un aimant; elle est plus ou moins grande dans l'acier trempé, suivant que la trempe est plus ou moins énergique.

L'expérience prouve, en effet, qu'un barreau d'acier, mis en contact avec un aimant, ne s'aimante que lentement; il est même nécessaire de le frictionner avec l'un des pôles de l'aimant, si l'on veut lui faire acquérir toute sa force; en outre, le barreau d'acier, une fois aimanté, ne perd que difficilement ses propriétés magnétiques. Par l'oxydation, la pression ou la torsion, le fer doux peut acquérir une certaine force coercitive, mais qui est de peu de durée.

765. **Distinction des substances magnétiques et des aimants.** — On nomme *substances magnétiques* les substances qui sont attirées par l'aimant, comme le fer, l'acier, le nickel. Les composés ferrugineux sont généralement magnétiques, et ils le sont d'autant plus qu'ils contiennent plus de fer.

Il est facile de distinguer une substance magnétique d'un aimant : la substance magnétique *n'a pas de pôles*; présentée suc-

cessivement aux deux extrémités d'une aiguille aimantée (mobile sur un pivot vertical), telle que *ab* (fig. 696), elle les attire également toutes les deux, tandis qu'un pôle d'aimant attirerait l'une et repousserait l'autre.

Les substances magnétiques privées de force coercitive, comme le fer doux, le nickel pur, ne sont plus attirables à l'aimant lorsqu'elles sont portées à une température suffisamment élevée, qu'on appelle *température critique*. Ainsi le fer doux cesse brusquement d'être magnétique vers 780°, et le nickel vers 350°.

766. **Aimantation par influence. — Fantômes magnétiques.** — Lorsqu'une substance magnétique est mise en contact avec un barreau aimanté, elle devient, tant que le contact persiste, un

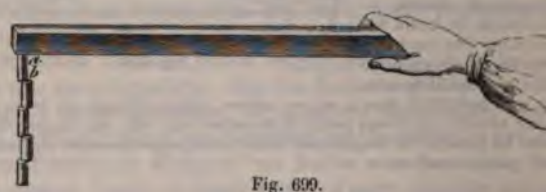


Fig. 699.

aimant complet, ayant deux pôles et une ligne neutre. Par exemple, si l'on fait porter par l'un des pôles d'un aimant un petit cylindre de fer doux *ab* (fig. 699), ce cylindre peut, à son tour, porter un second cylindre semblable, puis celui-ci un troisième, et ainsi de suite, jusqu'à sept ou huit, suivant le barreau. Chacun d'eux est donc devenu un aimant et reste un aimant aussi longtemps que dure l'influence; mais dès qu'on supprime le contact avec le premier cylindre, cette influence cesse : aussitôt les autres cylindres se détachent et ne conservent aucune trace de magnétisme.

Ce phénomène permet d'expliquer la formation des houppes de limaille qui s'attachent aux pôles des aimants (fig. 694). Les parcelles qui sont en contact avec l'aimant deviennent autant de petits aimants et agissent par influence sur les parcelles voisines; celles-ci agissent de même sur les suivantes, et ainsi de suite jusqu'à une certaine distance où l'influence, finit par s'annuler.

L'aimantation par influence se produit aussi à distance, mais avec d'autant plus d'intensité que cette distance est plus faible et que l'aimant est plus fort. C'est ainsi qu'on produit les figures symétriques (fig. 700) appelées fantômes ou spectres magnétiques.

On obtient ces courbes en appliquant sur un barreau horizontal un carton mince que l'on saupoudre, à l'aide d'un petit tamis, d'une couche de limaille de fer. Celle-ci se dispose spontanément, sous l'influence des pôles de l'aimant, en courbes régulières,

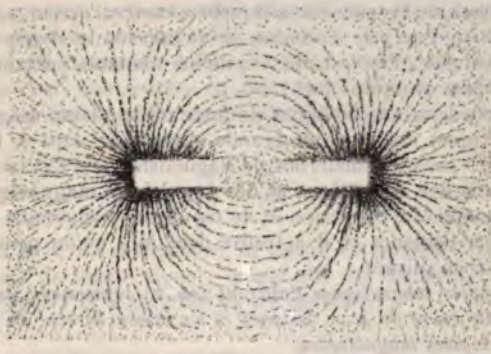


Fig. 700.

allant d'un pôle à l'autre et changeant de direction aux extrémités du barreau. On peut fixer le *spectre magnétique* en le pro-

Fig. 701.

duisant sur un papier gommé que l'on mouille ensuite au moyen d'un vaporisateur.

Dans le cas où le barreau aimanté a des points conséquents, le spectre magnétique a la forme représentée par la figure 701.

767. **Lignes de force** et **Champ magnétique.** — Ce sont ces courbes magnétiques qui donnèrent à Faraday l'idée des *lignes de force*. Il appela ainsi les lignes suivant lesquelles s'exercent les

attractions et les répulsions magnétiques (et électriques). Elles sont parfaitement déterminées, par les lignes de limaille, dans les fantômes magnétiques (fig. 700, 701). On convient de donner un *sens* aux lignes de force : on les considère comme se propageant de la région Nord *vers la région* Sud de l'aimant.

La portion de l'espace dans laquelle s'exerce l'action attractive ou répulsive d'un pôle d'aimant, a été appelée le *champ magnétique* de ce pôle. Elle est plus ou moins étendue, suivant que le pôle est plus ou moins fort [1].

Les considérations de lignes de force et de champ magnétique (ou électrique) ont pris une grande importance dans le langage et dans les théories modernes de Magnétisme et d'Électricité.

768. **Lois des attractions et des répulsions magnétiques.** — Les phénomènes d'attraction et de répulsion magnétique ont été étudiés par Coulomb et il a trouvé deux lois, qu'on peut réunir dans l'énoncé suivant :

Deux pôles magnétiques s'attirent (ou se repoussent) en raison inverse du carré de leur distance et en raison directe du produit de leurs masses magnétiques.

Coulomb définissait la *masse* d'un pôle magnétique par l'action du magnétisme terrestre. Deux pôles avaient la même masse ou la même intensité magnétique quand ils éprouvaient des actions égales de la part de la terre ; deux pôles de même masse magnétique constituaient, par leur assemblage, un pôle de masse ou d'intensité double, etc. Il a vérifié ces lois par deux méthodes, celle de la balance de torsion [2] et celle des oscillations [3].

769. **Formule des lois de Coulomb. — Unité de magnétisme.** — Il résulte des lois précédentes que l'attraction, ou la répulsion, qui s'exerce entre deux pôles d'aimant, de masses μ et μ', séparés par une distance d, est exprimée par la formule

$$F = k\frac{\mu\mu'}{d^2},$$

k étant une constante qui représente l'action réciproque de deux masses magnétiques égales à 1 et séparées par la distance 1. La valeur de k dépendra du choix des unités de force et de magnétisme.

1. L'action s'exerce théoriquement dans tout l'espace ; mais elle cesse rapidement de se faire sentir lorsque la distance augmente.

2. On verra ci-dessous la description de la balance de Coulomb et son usage pour l'étude des actions électriques. Quant à la méthode générale des oscillations, elle a été exposée ci-dessus (72, 2°).

3. Elles ont été mieux vérifiées a posteriori par les expériences de Gauss (736).

Or on appelle *unité de magnétisme* ou *unité de masse magnétique* (dans le système C. G. S.) la quantité de magnétisme qu'il faut supposer concentrée en un pôle d'aimant pour que l'action exercée, à la distance de *un centimètre*, sur une masse identique, soit égale à une *dyne*. On donne à la masse le signe + ou le signe —, suivant qu'il s'agit du magnétisme qui charge un pôle Nord ou de celui qui charge un pôle Sud.

Cette unité étant ainsi définie, la force qui s'exerce entre deux masses μ et μ', concentrées en deux pôles séparés par une distance d, est exprimée (en *dynes*) par la formule

$$F = \frac{\mu\mu'}{d^2}.$$

Quand la force F est répulsive, sa valeur est positive (car alors μ et μ' sont de même signe); quand elle est attractive, elle a le signe — (car μ et μ' sont des signes contraires).

770. **Intensité d'un champ magnétique.** — Un pôle d'aimant, placé dans un champ magnétique, y subit une attraction ou une répulsion, qui dépend à la fois de la masse magnétique de ce pôle et de l'*intensité du champ*.

On appelle *intensité d'un champ magnétique* en un point la grandeur de la force qui agirait en ce point sur l'unité de magnétisme Nord.

Soit h l'intensité d'un champ en un point, la force F qui agit en ce point sur un pôle magnétique de masse μ est donnée par l'équation de Coulomb. On a $F = \mu h$. La direction de la force est la direction du champ.

Fig. 702.

771. **Champ magnétique uniforme.** — On appelle *champ magnétique uniforme* un champ où la force magnétique exercée, en chaque point, sur l'unité de magnétisme Nord, est *constante* en grandeur et en direction. Le magnétisme terrestre produit un champ magnétique qui est sensiblement uniforme *dans un espace limité* (fig. 702 et 703).

772. **Définition précise des pôles.** — Un aimant étant placé dans un champ uniforme, chaque élément de magnétisme subit une action parallèle au champ (fig 702). Ces actions, formant un système de forces parallèles, peuvent être composées comme le sont les poids des différents éléments d'un corps. Le point d'application de la résultante, centre de ce système de forces parallèles, se nomme *le pôle* du système. Et comme l'expérience prouve (777) qu'il y a deux systèmes égaux de forces parallèles et opposées, il existe deux pôles. Donc un barreau aimanté est réductible, dans un champ uniforme, à deux pôles égaux, points où sont concentrés respectivement les magnétismes Nord et Sud qui chargent le barreau, et qui sont invariablement liés.

773. Moment magnétique d'un barreau aimanté. — Intensité d'aimantation. — Lorsqu'un barreau, régulièrement aimanté, se trouve dans un champ magnétique uniforme, il est soumis à deux forces égales et contraires appliquées en ses deux pôles et formant un couple.

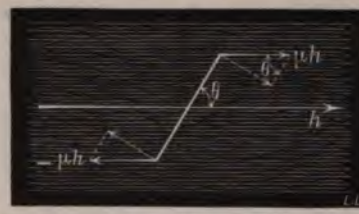


Fig. 703.

Si l'aimant est placé normalement à la direction fixe du couple (fig. 702), celui-ci tendra à le faire tourner, de manière à l'amener dans sa propre direction. Le moment du couple de rotation sera pour cette position $2lF$, en appelant $2l$ la longueur de l'aiguille. En remplaçant F par sa valeur, on aura $-C = 2l\mu h$.

Si l'aimant fait un angle θ avec la direction du champ (fig. 703), le moment C_θ sera

$$C_\theta = 2l\,\mu h \sin\theta = C.\sin\theta.$$

Le produit $2l\mu$ est appelé *moment magnétique* du barreau aimanté : on le représente par la lettre M. On peut donc écrire $C_\theta = Mh\sin\theta$.

Si on fait le quotient du moment magnétique M d'un aimant *uniforme* par son volume V, on a ce qu'on appelle l'*intensité d'aimantation* A du barreau. On a $A = \frac{M}{V}$.

774. Expériences de Gauss. — Vérification de la loi de Coulomb. — Admettons la loi de Coulomb et voyons quelques-unes de ses conséquences.

Fig. 704.

Il est clair que le pôle m, situé à égale distance des pôles μ et $-\mu$, subit l'attraction f et la répulsion égale $-f$ (fig. 704); la résultante x est visiblement la base d'un triangle isocèle de côté f : donc

$$x = 2f\cos(f, x);$$

or

$$\cos(f, x) = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) = \sin\beta;$$

en désignant par l la demi-distance des pôles, on a

$$\operatorname{Sin}\beta = \frac{l}{d}; \quad \text{d'où} \quad x = \frac{2f.l}{d}.$$

Mais

$$f = \frac{\mu m}{d^2}, \quad \text{donc} \quad x = \frac{2\mu m l}{d^3}.$$

Comme l'aiguille $(m, -m)$ prend une position d'équilibre sous l'action de la force x due à l'aimant déviant et de la force H_1 due à la terre, on a, en désignant par α l'angle de l'aiguille avec sa position d'équilibre :

$$\operatorname{tang}\alpha = \frac{x}{H_1} = \frac{m.2\mu l}{d^3 M_1};$$

or $\quad H_1 = \mu H \quad$ et $\quad 2\mu.l = M, \quad$ donc $\quad \operatorname{tang}\alpha = \frac{M.}{H.d^3}.$

En choisissant la distance d très grande par rapport aux dimensions du barreau déviant et de l'aiguille mobile, on voit que :

1° L'angle de déviation α est indépendant de l'aiguille déviée;

2° Que la tangente de cet angle varie en raison inverse du cube de la distance à laquelle on place le barreau déviant;

3° En retournant le barreau bout pour bout, la déviation change de signe;

4° On démontre par le calcul que le barreau déviant déplacé parallèlement à lui-même et amené sur une perpendiculaire au méridien passant par le centre de l'aiguille mobile, donne lieu à une déviation double de la précédente.

Toutes ces conséquences de la loi de Coulomb ont été vérifiées expérimentalement par Gauss et la loi de Coulomb se trouve ainsi démontrée *a posteriori*.

775. **Potentiel magnétique.** — Les attractions et les répulsions magnétiques étant définies par la loi du carré des distances, on peut appliquer au magnétisme la théorie du potentiel [1].

On appelle *potentiel magnétique* en un point quelconque (où l'on suppose concentrée l'unité du magnétisme Nord) la somme

$$\frac{\mu_1}{r_1} + \frac{\mu_2}{r_2} + \cdots = \Sigma\left(\frac{\mu}{r}\right) = V,$$

dans laquelle $\mu_1, \mu_2 \ldots$ sont les masses magnétiques, positives ou négatives, disséminées dans le champ magnétique, et $r_1, r_2 \ldots$ les distances respectives du point à ces différentes masses.

Toutes les propriétés que nous démontrerons plus loin pour le potentiel électrique s'appliquent au potentiel magnétique.

776. **Action des aimants sur tous les corps. — Substances diamagnétiques.** — Dès 1802, Coulomb observa que les aimants agissent avec plus ou moins de force sur *tous* les corps. Il constata ce fait en faisant osciller de petits barreaux de différentes substances d'abord entre les pôles opposés de deux forts barreaux aimantés, puis loin de l'influence de tout aimant. La comparaison des nombres d'oscillations exécutés, dans les deux cas, en des temps égaux, mettait en évidence l'action magnétique.

On attribua d'abord ce phénomène à la présence de matières ferrugineuses dans les corps soumis à l'expérience; mais Lebaillif, Faraday et Becquerel ont démontré que les aimants exercent réellement une action sur *tous les corps*, même sur les gaz.

On a constaté de plus que cette action est tantôt attractive et tantôt répulsive : les corps attirés ont reçu le nom de *corps magnétiques* ou *paramagnétiques*, et ceux qui sont repoussés celui de *substances diamagnétiques*. Parmi ces derniers sont le bismuth, le plomb, le soufre, la cire, l'eau, etc.

Remarque. — Les substances magnétiques placées dans un champ se recouvrent de magnétisme Nord dans les régions où les

1. Comme nous développerons cette théorie à propos des actions électriques, nous nous bornerons ici à la définition.

lignes de force du champ pénètrent dans le corps et de magnétisme Sud dans les régions où elles quittent le corps. C'est le contraire pour les substances *diamagnétiques*.

CHAPITRE II

MAGNÉTISME TERRESTRE.

BOUSSOLES DE DÉCLINAISON ET D'INCLINAISON.

777. **Action de la terre sur les aimants. — Couple terrestre.** — Lorsqu'on suspend une aiguille aimantée à un fil (fig. 696) ou lorsqu'on la pose sur un pivot autour duquel elle peut librement tourner (fig. 705), l'aiguille, au lieu de s'arrêter dans une position quelconque, finit toujours par se fixer dans une direction voisine de la ligne nord-sud : donc l'action terrestre sur une aiguille aimantée équivaut à un système de forces. Est-ce un système *quelconque*, réductible à un couple *plus* une force? C'est ce que l'expérience va nous apprendre.

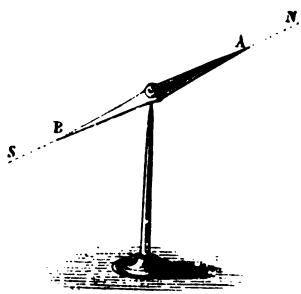


Fig. 705.

1° *L'action magnétique terrestre n'a pas de composante verticale.* — On a constaté, en effet, à l'aide de pesées très précises, qu'un barreau d'acier ne pèse pas plus *après* qu'*avant* l'aimantation.

2° *L'action magnétique terrestre n'a pas de composante horizontale.* — En effet, si dans un vase plein d'eau, on pose un disque de liège, et sur celui-ci un barreau aimanté, le liège oscille d'abord, puis se fixe dans une position telle, que la ligne des pôles de l'aimant soit sensiblement parallèle à la ligne Nord-Sud géographique (fig. 706); mais le liège et le barreau n'avancent *ni* vers le nord, ni vers le sud.

3° *L'action magnétique* terrestre se réduit à un couple. — En *effet*, puisque le système de forces magnétiques terrestres n'a ni

composante verticale ni composante horizontale, on doit en conclure qu'il se réduit à *un couple*. C'est ce qu'on appelle le *couple terrestre*.

L'existence du couple terrestre est donc un fait expérimental, indépendant de toute hypothèse sur l'origine du magnétisme terrestre. Le couple terrestre sera complètement défini quand on connaîtra : 1° sa *direction* en un lieu donné de la terre; 2° le *moment* de l'*action* qu'il exerce sur un aimant donné.

778. **Direction du couple terrestre. — Méridien magnétique. — Déclinaison et Inclinaison.** — On sait que le *méridien astronomique* en un point de la surface du globe est le plan qui passe par ce point et par les deux pôles terrestres, et que la *méridienne géographique* est la trace de ce plan sur le plan de l'horizon du lieu. De même, on appelle *méridien magnétique* d'un lieu donné le plan vertical qui passe par la direction du couple terrestre en ce lieu.

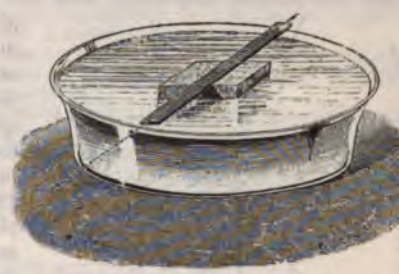


Fig. 706.

Nous démontrerons plus loin que le méridien magnétique coïncide avec le plan vertical mené par la direction d'équilibre de la ligne des pôles d'une aiguille de *déclinaison* (aiguille aimantée mobile sur un axe vertical). On se sert souvent de cette propriété pour définir le méridien magnétique. Cette direction d'équilibre de l'aiguille aimantée est elle-même la *méridienne magnétique*, car elle est la trace du méridien magnétique sur l'horizon géographique.

Le méridien magnétique ne coïncide pas, en général, avec le méridien astronomique d'un lieu. On nomme *déclinaison magnétique* en un lieu l'angle du méridien magnétique avec le méridien astronomique, ou, ce qui revient au même, l'angle que fait l'aiguille de déclinaison avec la méridienne géographique. La déclinaison est *orientale* ou *occidentale*, selon que le pôle Nord de l'aiguille se place à l'est ou à l'ouest du méridien astronomique.

On appelle *inclinaison magnétique* l'angle que fait la direction du couple terrestre avec l'horizontale du lieu. On mesure l'inclinaison par l'angle que la pointe nord (la pointe *bleue*) d'une

aiguille d'inclinaison (aiguille aimantée mobile autour d'un axe horizontal) fait avec l'horizontale de son centre de suspension, lorsque le plan vertical où se meut l'aiguille *coïncide avec le méridien magnétique du lieu.*

779. **Mesure de la déclinaison et de l'inclinaison.** — Une aiguille aimantée, qui serait suspendue par son centre de gravité de manière à se mouvoir *librement* dans l'espace, se mettrait spontanément en équilibre dans la direction qu'a le couple terrestre au lieu de l'expérience. De cette position d'équilibre on déduirait immédiatement : 1° la position du méridien magnétique ; 2° la déclinaison ; 3° l'inclinaison.

Mais une pareille suspension n'est pas réalisable. Une aiguille aimantée est nécessairement assujettie à l'axe autour duquel elle se meut, et elle n'est mobile que dans le plan perpendiculaire à cet axe. Si celui-ci est vertical, l'aiguille se meut dans un plan horizontal : c'est une *aiguille de déclinaison* ; si l'axe est horizontal, l'aiguille se meut dans un plan vertical : c'est une *aiguille d'inclinaison.* Dans le premier cas, la position d'équilibre donne la direction de la composante horizontale du couple terrestre ; dans le deuxième cas, la position d'équilibre correspond non pas au couple terrestre lui-même, mais à sa composante dans le plan même où se meut l'aiguille d'inclinaison.

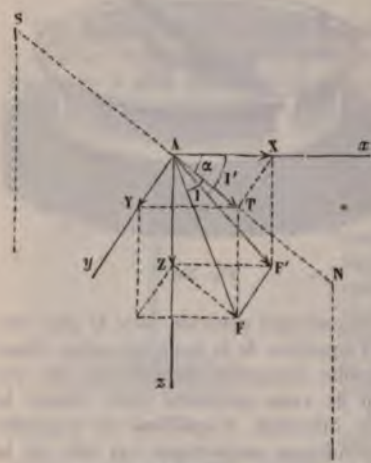


Fig. 707.

780. **Principe des méthodes de mesure : Décomposition du couple terrestre.** — Toutes les méthodes de mesure de l'inclinaison et de la déclinaison magnétique sont fondées sur la décomposition mécanique des forces du couple terrestre.

Soit A l'un des pôles d'une aiguille aimantée que nous supposerons *librement suspendue.* Cette aiguille se met spontanément en équilibre (fig. 707) dans la *direction* du couple terrestre. Soit AF l'une des forces du couple ; l'angle FAX, *que fait la* direction AF avec sa projection sur le plan horizontal xhy, est, par *définition*, l'inclinaison I ; et le plan vertical zXS, qui passe par la direction AF, *est le méridien* magnétique.

Décomposons la force F suivant trois directions rectangulaires quelconques. Soient d'abord les deux composantes T et Z dans le plan du méridien : elles ont pour valeurs respectivement

$$T = F \cos I, \qquad Z = F \sin I.$$

Décomposons maintenant la composante horizontale T dans son plan, on aura, en appelant α l'azimut du plan des xz,

$$X = T \cos \alpha = F \cos I \cos \alpha, \qquad Y = T \sin \alpha = F \cos I \sin \alpha.$$

De là résultent immédiatement les conséquences suivantes :

1° Si l'aiguille n'est mobile que dans un plan horizontal (aiguille de déclinaison), chacun de ses pôles sera soumis à une force égale à T. Elle restera ainsi en équilibre, lorsqu'elle sera dans la direction du couple (T, — T), c'est-à-dire suivant la trace du méridien magnétique. On voit pourquoi *l'aiguille de déclinaison sert à déterminer le méridien magnétique.*

2° Si l'aiguille est mobile dans un plan vertical (aiguille d'inclinaison), son angle avec l'horizontale ne mesurera l'inclinaison I qu'autant que son azimut coïncidera avec le méridien magnétique.

Dans tout autre azimut, chaque pôle sera soumis à deux forces X et Z ou à leur résultante F'; elle sera donc en équilibre dans la direction du couple (F', — F'), qui est différent du couple terrestre. L'angle qu'elle fera avec l'horizon dans cette position d'équilibre sera un angle I', différent de I, mais lié à I par une relation facile à établir. En effet, I' est l'angle F'AX que fait la résultante partielle F', qui est dans le plan xAz, avec la composante X. Or on a

$$[1] \qquad \operatorname{tang} I' = \frac{Z}{X} = \frac{F \sin I}{F \cos I \cos \alpha} = \frac{\operatorname{tang} I}{\cos \alpha}.$$

Il est quelquefois commode de considérer la cotangente au lieu de la tangente. On sait qu'elle est égale à l'inverse de la tangente. On a donc

$$[2] \qquad \cot I' = \frac{1}{\operatorname{tang} I} \cos \alpha = \cot I \cos \alpha.$$

781. Boussole de déclinaison. — La déclinaison magnétique en un lieu donné se mesure au moyen d'instruments spéciaux, appelés *boussoles de déclinaison.*

Description. — La boussole de déclinaison *ordinaire* se compose d'une boîte de cuivre rouge AB (fig. 708) au centre de laquelle est une aiguille aimantée *ab*, mobile sur un pivot. A la paroi de la boîte sont appliqués deux montants qui supportent un axe horizontal X, sur lequel est fixée une lunette astronomique L, mobile dans un plan vertical. La boîte AB est soutenue par un pied P sur lequel elle tourne librement dans le sens horizontal, entraînant la lunette dans son mouvement. Un cercle fixe QR, qu'on nomme *cercle azimutal*, sert à mesurer au moyen d'un vernier V fixé à la boîte les angles de rotation de la lunette. Enfin l'*inclinaison de la lunette par* rapport à l'horizon se mesure à l'aide

d'un vernier K, qui reçoit son mouvement de l'axe de la lunette, et se déplace sur un arc de cercle gradué et fixe x.

Opération. — I. *Cas où le méridien astronomique du lieu est connu.* — On commence par disposer la boussole bien horizontalement, au moyen de vis calantes S, S, et d'un niveau n; puis on amène la lunette dans le plan du méridien astronomique, et on note la position du vernier sur le limbe QR. On fait ensuite

Fig. 708.

tourner la boîte AB jusqu'à ce que le pôle nord de l'aiguille vienne exactement en regard d'un repère tracé sur la paroi, dans le plan vertical de la lunette : l'arc dont on a tourné le vernier sur le limbe donne la déclinaison; elle est occidentale ou orientale, suivant le sens de la rotation.

II. Cas où le méridien astronomique du lieu n'est pas connu. — *On peut* le déterminer à l'aide de la boussole même. Pour cela, *on fait* usage du cercle azimutal QR et de l'arc de cercle x. On

observe avec la lunette un astre connu, avant et après son passage au méridien, et l'on applique la *méthode des hauteurs égales* décrites dans les traités de cosmographie, pour déterminer la méridienne.

782. Causes d'erreur et corrections : Méthode du retournement. — L'axe magnétique de l'aiguille, c'est-à-dire la droite *mn* qui passe par ses deux pôles, doit coïncider avec l'axe de figure, c'est-à-dire avec la droite *ab* qui joint ses deux extrémités. En général, cette condition n'est pas satisfaite. On corrige cette cause d'erreur par la méthode du retournement.

L'aiguille étant simplement posée, mais non fixée sur sa chape, on peut l'enlever et, après l'avoir retournée, la remettre en place. On fait alors une deuxième observation de la déclinaison et la moyenne des deux résultats est

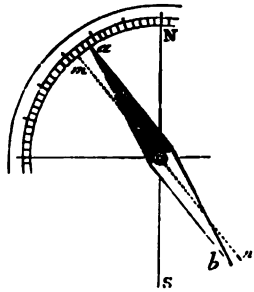


Fig. 709.

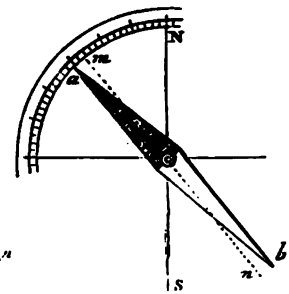


Fig. 710.

égale à la déclinaison vraie. En effet, on avait dans la première expérience (fig. 709)

$$aN = D - am,$$

et l'on a dans la deuxième expérience (fig. 710)

$$[aN] = D + am, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{aN + [aN]}{2} = D$$

la déclinaison vraie est donc la *moyenne arithmétique des deux déclinaisons observées.*

783. Boussole marine. — L'action directrice de la terre sur l'aiguille aimantée a reçu une importante application dans la *boussole marine*, connue aussi sous les noms de *compas de variation* et de *compas de mer*. C'est une boussole de déclinaison dont on se sert en mer pour diriger la marche des navires [1] (fig. 711).

1. On ne connaît point l'inventeur de la boussole, ni l'époque précise de son invention. Guyot de Provins, poète français du XIIe siècle, parle le premier de l'usage de l'aimant pour la navigation. Les anciens navigateurs, qui ne connaissaient pas la boussole, n'avaient d'autres guides que le soleil ou l'étoile polaire aussi étaient-ils obligés de naviguer constamment en vue des côtes.

Description de l'instrument — La boussole consiste en une boîte cylindrique de cuivre BB', lestée à la partie inférieure par une masse de plomb, et suspendue à la Cardan ; elle conserve ainsi la position horizontale malgré le roulis et le tangage du navire. Au fond de la boîte est fixé un pivot vertical sur lequel un

Fig. 711.

barreau aimanté *ab* est posé sur une chape (fig. 712) : c'est l'*aiguille* de la boussole. Elle porte un disque de mica, d'un diamètre un peu plus grand, sur lequel est collé un autre disque de papier O, où est tracée la *rose des vents*. On

Fig. 712.

appelle ainsi une étoile à 32 branches, comprenant les 8 rumbs de vent, les demi-rumbs et les quarts de rumb. L'une des branches est terminée par une petite étoile et désignée par N ; elle correspond au barreau *ab* qui est sous le disque, et marque le méridien magnétique.

Usage de la boussole. — La boussole est placée à l'arrière des vaisseaux, dans l'*habitacle*. Pour s'en servir, on cherche d'abord, sur une carte marine, suivant quel rumb de vent le vaisseau doit être dirigé. Alors le timonier, l'œil fixé sur la boussole, tourne la barre du gouvernail jusqu'à ce que le rumb déterminé, marqué sur la rose, vienne coïncider avec la *ligne de foi* : on appelle ainsi une ligne passant par un trait *d* marqué sur la paroi intérieure de la boîte BB', et dirigée parallèlement à la quille du vaisseau. Toutefois, dans cette manœuvre, on doit tenir compte des variations qu'éprouve la déclinaison sur les différents points du globe et corriger continuellement les indications de la boussole.

784. Variations de la déclinaison. — La déclinaison de l'aiguille aimantée, très variable d'un lieu à un autre, est *occidentale* en Europe et en Afrique, *orientale* en Asie et dans les deux Amériques. De plus, dans un même lieu elle présente de nombreuses variations : les unes, qu'on peut considérer comme régulières, sont séculaires, annuelles ou diurnes ; les autres, qui sont irrégulières, se désignent sous le nom de *perturbations*.

Variations séculaires. — En un même lieu l'aiguille de déclinaison exécute, de l'est et à l'ouest du méridien astronomique, des oscillations dont la durée est de plusieurs siècles. On connaît la déclinaison à Paris depuis 1580 : elle était alors de 11°30′ à l'*est* ; elle a diminué jusqu'en 1666 où elle était nulle, puis elle a passé à l'ouest et augmenté continuellement jusqu'en 1814, où elle était de 22°34′ à l'*ouest* ; depuis cette époque, l'aiguille revient vers l'orient. Le 1er janvier 1895, à l'observatoire du Parc Saint-Maur, elle était de 15°24′,5.

Variations annuelles. — Les variations annuelles ont été signalées par Cassini, en 1784. Le maximum de variation observé a été de 20 minutes. Du reste, ces variations annuelles sont fort peu connues et ne paraissent pas constantes.

Variations diurnes. — La déclinaison éprouve des variations diurnes, qui sont très faibles et qu'on ne peut observer que sur de longues aiguilles et à l'aide d'instruments très sensibles. A Paris, l'amplitude moyenne de la variation diurne est, pour avril, mai, juin, juillet, août et septembre, de 13 à 15 minutes, et, pour les autres mois, de 8 à 10 minutes. L'amplitude des variations diurnes décroît des pôles vers l'équateur, où elle est très faible. Près de l'équateur, il existe une ligne sans variation diurne.

Fig. 713.

Perturbations. — La déclinaison de l'aiguille aimantée est troublée dans ses variations diurnes par plusieurs causes : aurores boréales, éruptions volcaniques, chute de la foudre. L'effet des aurores boréales se fait sentir à de grandes distances. Des aurores qui ne sont visibles que dans le nord de l'Europe agissent encore sur l'aiguille à Paris, où l'on a observé des variations accidentelles de 20 minutes. Dans les régions polaires, l'aiguille oscille quelquefois de plusieurs degrés. L'irrégularité de sa marche pendant toute la journée qui précède l'aurore boréale est un présage du phénomène.

785. Boussole d'inclinaison. — L'inclinaison magnétique en un *lieu donné se mesure à l'aide de la boussole d'inclinaison.*

Description. — Cet instrument est entièrement construit en cuivre. Un premier cercle horizontal *m*, gradué et porté par un pied à vis calantes (fig. 715), sert de support à la boussole proprement dite. Celle-ci consiste en un deuxième cercle vertical gradué M, sur lequel se meut une aiguille aimantée. L'axe horizontal de l'aiguille est porté par un châssis *rd*, monté sur un plateau A et mobile autour d'un axe vertical. A l'aide d'un niveau *n* et des trois vis calantes, on peut placer horizontalement le diamètre qui passe par les deux zéros du cercle M.

Mesure de l'inclinaison. — On peut employer deux méthodes, fondées l'une et l'autre sur les équations du § 780.

1° *Méthode directe.* — L'angle I' que fait avec l'horizontale l'aiguille d'inclinaison placée dans un azimut quelconque α, est lié à l'inclinaison absolue I par la relation

$$\text{tang } I' = \text{tang } I \frac{1}{\cos \alpha}.$$

On voit, d'après cette équation, que tang I' est proportionnelle au facteur $\frac{1}{\cos \alpha}$. Or celui-ci est maximum pour $\cos \alpha = 0$, c'est-à-dire pour $\alpha = 90°$: donc tang I', et par suite l'angle I', sera maximum dans un azimut perpendiculaire au méridien magnétique ; on aura alors tang $I' = \infty$ et $I' = 90°$; donc *le méridien magnétique est à 90° de l'azimut dans lequel l'aiguille d'inclinaison est verticale.*

On voit aussi que $\frac{1}{\cos \alpha}$ est minimum pour $\cos \alpha = 1$ et $\alpha = 0°$; or on a alors tang $I' =$ tang I ; donc *l'inclinaison absolue est le plus petit angle que puisse faire l'aiguille d'inclinaison.*

Opération. — On commence par déterminer le méridien magnétique. Pour cela on tourne le plateau A sur le cercle *m* jusqu'à ce que l'aiguille devienne verticale : il suffit alors de tourner le plateau A de 90° sur le cercle *m* pour amener le cercle vertical M dans le méridien magnétique. L'angle *dca* que fait alors l'aiguille *ab* avec le diamètre horizontal, est égal à l'inclinaison.

Causes d'erreur et *Corrections.* — Il y a ici deux causes d'erreur dont il importe de tenir compte. 1° L'axe magnétique de l'aiguille peut ne pas coïncider avec son axe de figure ; de là une erreur qu'on corrige par la méthode du retournement. 2° Le centre de gravité de l'aiguille peut ne pas coïncider avec l'axe de suspension ; alors l'angle *dca* est trop petit ou trop grand, selon que le centre de gravité est au-dessus ou au-dessous du centre de suspension ; car dans le premier cas l'action de la pesanteur est contraire à celle du magnétisme terrestre pour faire incliner l'aiguille, tandis que dans le second elle est de *même sens.* On corrige cette erreur en renversant les pôles de l'aiguille : l'angle *d'inclinaison,* qui était trop petit, devient trop grand de la même quantité. *On aura donc* sa vraie valeur en prenant la moyenne arithmétique des deux *mesures.*

2° *Méthode des azimuts rectangulaires.* — *Principe.* — Si l'on place l'aiguille d'inclinaison dans un azimut quelconque α, l'angle I' qu'on observe est lié à l'angle I par la relation

$$[1] \qquad \cot I' = \cot I \cos \alpha.$$

Supposons qu'on tourne le limbe de 90°, de manière à le placer dans un azimut α' égal à $90° + \alpha$. Comme on a $\cos \alpha' = \cos (90° + \alpha) = -\sin \alpha$, la relation entre I et le nouvel angle I'' sera

$$[2] \qquad \cot I'' = -\cot I \sin \alpha.$$

Élevons au carré les deux membres de chaque équation et ajoutons-les, nous aurons

$$[3] \qquad \cot^2 I' + \cot^2 I'' = \cot^2 I (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) = \cot^2 I.$$

Opération. — En faisant deux déterminations dans des azimuts rectangulaires, on obtiendra l'inclinaison au moyen de l'équation [3], sans se préoccuper de déterminer préalablement le méridien magnétique.

786. **Variations de l'inclinaison.** — L'inclinaison, de même que la déclinaison, varie d'un lieu à un autre, mais suivant une loi mieux déterminée. Dans notre hémisphère c'est le pôle austral de l'aiguille qui plonge au-dessous de l'horizon : on observe vers le pôle nord des points où l'inclinaison est de 90°; puis, à partir de là, elle décroît avec la latitude jusqu'à l'équateur, où elle est nulle, tantôt sur ce cercle même, tantôt en des points qui en sont peu distants. Dans l'hémisphère austral l'inclinaison reparaît, mais en sens contraire; car c'est le pôle sud de l'aiguille qui s'abaisse au-dessous de l'horizon.

On nomme *équateur magnétique* la courbe qui passe par tous les points où l'inclinaison est nulle, et *pôles magnétiques* les points où l'inclinaison est de 90°. D'après les observations de Duperrey, l'équateur magnétique coupe l'équateur terrestre en deux points presque diamétralement opposés, l'un dans le Grand Océan, l'autre dans l'océan Atlantique. Ces points paraissent animés d'un mouvement de translation d'orient en occident. Quant aux pôles magnétiques, il en existe deux : l'un dans l'hémisphère boréal, près de l'île Melville; l'autre dans l'hémisphère austral, sur la terre Victoria, à l'ouest du volcan Erebus; mais la position de ces points varie avec celle de l'équateur magnétique.

L'inclinaison varie aussi dans un même lieu d'une époque à une autre. En 1671, elle était à Paris de 75°. Depuis elle a toujours été en décroissant : le 1er janvier 1893, au Parc Saint-Maur elle était de 65° 8',5. Depuis vingt-cinq ans, elle a diminué en moyenne de 3',3'' par année.

787. **Mesure de l'intensité du magnétisme terrestre.** — L'action F de la terre sur un pôle d'aimant, en un lieu donné, dépend à la fois de l'intensité du champ magnétique terrestre et de la masse magnétique des pôles de l'aimant.

En appelant h l'intensité du champ magnétique terrestre en un lieu donné, on a $F = h\mu$ et *cette force* F *a la direction* de la moitié Nord de l'aiguille d'inclinaison.

Le moment de cette action sur une aiguille de longueur $2l$ est, par définition, $C = 2l\mu h$ ou Mh.

Cette formule suppose, soit que le barreau est libre de se mouvoir dans toutes les *directions, soit qu'il peut* tourner dans le plan même du méridien magnétique. *S'il s'agit de l'aiguille* de déclinaison, le moment du couple terrestre a

pour valeur $Mh \cos I$ ou MH, en désignant par H la composante horizontale du champ terrestre.

La méthode employée pour mesurer l'intensité H du champ horizontal en un lieu donné consiste à faire deux expériences successives :

Le première a pour objet de fournir MH; la deuxième donne $\frac{M}{H}$.

1° *Détermination de* MH. — Elle peut se faire soit à l'aide de la balance de Coulomb, soit par la méthode des oscillations. C'est cette dernière qui est la plus précise. En désignant par T la durée *observée* de l'oscillation de l'aimant sous l'action de la terre, on sait que l'on a

$$[1] \qquad T = 2\pi\sqrt{\frac{\Sigma mr^2}{MH}},$$

Σmr^2 désignant le moment d'inertie calculé de l'aimant; de cette relation on tire

$$[2] \qquad MH = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot \sqrt{\Sigma mr^2}$$

ou encore

$$MH = 4\pi^2 N^2 . \Sigma mr^2,$$

si N est le nombre des oscillations effectuées par l'aimant en une seconde. (La formule [1] suppose les oscillations de faible amplitude.)

Dans une expérience faite à Göttingue en 1852, Gauss obtint par cette méthode MH = 179770600, en prenant pour unités fondamentales la seconde, le millimètre et la masse du milligramme.

2° *Détermination de* $\frac{M}{H}$. — Elle se fait par la méthode de Gauss, dont la théorie a été précédemment indiquée. Elle consiste à faire agir l'aimant qui a déjà servi dans l'expérience précédente, sur une petite aiguille aimantée mobile, dont on observe la déviation α.

On place le barreau aimanté AB perpendiculairement au méridien magnétique, et à une certaine distance connue d de l'aiguille. Celle-ci peut être disposée dans deux situations différentes, dites *positions de Gauss*. Dans le cas de la figure 705 on a

$$\tan\alpha = \frac{M}{Hd^3}$$

et par suite

$$[3] \qquad \frac{M}{H} = d^3 \tan\alpha.$$

Des équations [2] et [3] on peut tirer H. Comme on connaît l'inclinaison I, on a h par la relation $h \cos I = H$. $h \sin I$ donne alors la composante verticale V du champ terrestre.

Résultats généraux. — Les valeurs actuelles des composantes du magnétisme terrestre, déduites d'observations faites au Parc Saint-Maur au 31 décembre 1892, sont en unités C. G. S. :

pour la composante horizontale	H = 0,19596
— verticale	V = 0,42297
pour l'intensité totale	h = 0,46616

788. **Moment magnétique des barreaux aimantés.** — Ces méthodes de Gauss conduisent également à la détermination du moment magnétique absolu

d'un barreau quelconque. En effet, en soumettant ce barreau aux deux séries de mesures précédentes, on obtiendra

$$[1] \qquad MH = a \qquad \text{et} \qquad \frac{M}{H} = b. \qquad [2]$$

En multipliant ces deux équations membre à membre, il vient

$$M^2 = ab, \qquad \text{d'où} \qquad M = \sqrt{ab}.$$

Par exemple, le moment magnétique d'un aimant d'acier Clémandot, long de 9,90 cm, d'une masse de 79,518 g, est exprimé en unités C. G. S. par le nombre 1801.

789. Aiguille et système astatiques. — On nomme *aiguille astatique* une aiguille aimantée qui est soustraite à l'action magnétique de la terre. Telle serait une aiguille mobile autour d'un axe situé dans le plan du méridien magnétique, parallèlement à l'inclinaison; car le couple magnétique terrestre, agissant alors suivant l'axe, ne pourrait imprimer à l'aiguille aucun mouvement.

On appelle *système astatique* l'ensemble de deux aiguilles aimantées au même degré et réunies parallèlement, les pôles contraires en regard (fig. 714). Si les pôles sont rigoureusement de même intensité, les actions contraires du magnétisme terrestre sur les pôles en regard se détruisent deux à deux et le système est *astatique*. On verra une application importante d'un pareil système dans le *galvanomètre*.

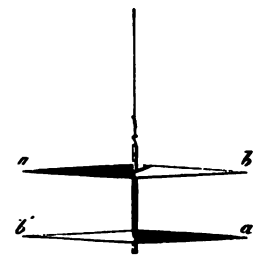


Fig. 714.

CHAPITRE III

DISTRIBUTION DU MAGNÉTISME DANS LES BARREAUX AIMANTÉS. PROCÉDÉS D'AIMANTATION.

DISTRIBUTION DU MAGNÉTISME.

790. Expériences de Coulomb. — Un aimant ne possède pas la propriété magnétique en ses deux pôles seulement : elle existe *dans les différentes* tranches du barreau, à des degrés inégaux.

Coulomb a étudié la distribution du magnétisme dans un aimant, au moyen de deux méthodes : la méthode de la *balance de torsion* et la méthode des *oscillations*.

Résultats. — 1° *Courbe du magnétisme.* — Il aimantait *à saturation* des fils cylindriques, de 4 millimètres de diamètre, faits du même acier et fortement trempés. Ayant déterminé les actions φ', φ'',... des diverses tranches m, m', il les représentait graphiquement en élevant, en chaque point du barreau, une ordonnée proportionnelle à l'action φ correspondante, et par suite à la *quantité de magnétisme* qu'on suppose concentrée dans cette tranche. On voit que la quantité de magnétisme va en croissant depuis un point M, voisin du milieu, où elle est nulle, jusqu'à l'extrémité O du barreau, où elle est maximum. A l'autre moitié du barreau correspond une autre courbe, identique à celle-ci, figurative du magnétisme boréal. On la distingue de la précédente en élevant des ordonnées *négatives*. La courbe complète du magnétisme a donc deux branches symétriques par rapport au milieu du barreau (fig. 715).

Détermination des pôles. — Elle peut se déduire de la courbe du magnétisme du barreau considéré.

En effet, nous savons que les pôles sont les points d'application des forces magnétiques parallèles, provenant de l'action du couple terrestre, sur les diverses

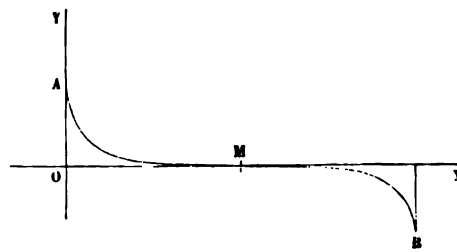


Fig. 715.

tranches du barreau. Or on démontre aisément que, étant donnée à chaque extrémité la courbe des intensités, le pôle est la projection sur le barreau du centre de gravité de la surface de chaque courbe.

Pour un barreau court, les surfaces limitées par les courbes magnétiques se réduisent à des triangles, et les pôles coïncident avec les projections des centres de gravité de ces triangles.

PROCÉDÉS D'AIMANTATION.

791. Sources et méthodes d'aimantation. — Saturation. — Les diverses sources de magnétisme sont les aimants naturels, le magnétisme terrestre et le courant électrique. Cette dernière est la plus puissante et elle est exclusivement employée pour les barreaux de grande section. Les autres procédés peuvent servir pour les barreaux de faible section.

Quelle que soit la méthode d'aimantation employée, on constate qu'il y a une limite à l'aimantation que peut acquérir un barreau. Cette limite dépend à la fois des dimensions du barreau, de son degré de trempe et de l'intensité de la source; lorsqu'elle est atteinte, on dit que le barreau est aimanté *à saturation*. Lorsque le point de saturation a été dépassé, le barreau y revient bientôt, et tend même à descendre au-dessous, si l'on n'entretient pas sa force magnétique à l'aide d'armures, comme on le verra ci-après (795).

792. **Aimantation par les aimants.** — Cette méthode s'applique par trois procédés classiques : 1° la *simple touche*; 2° la *touche séparée*; 3° la *double touche*.

1° *Procédé de la simple touche.* — On fait glisser le pôle d'un fort aimant d'un bout à l'autre du barreau qu'on veut aimanter, et l'on réitère plusieurs fois les frictions, toujours dans le même sens : la dernière extrémité que touche l'aimant mobile présente un pôle de nom contraire au pôle qui sert aux frictions.

Remarque. — Ce procédé fut le premier employé, parce qu'il est, en effet, le plus simple. Le simple contact d'un pôle d'aimant suffit, à la rigueur, pour aimanter un barreau d'acier. C'est ainsi qu'on fabriquait, dès le XIIe siècle, des aiguilles de boussole par simple contact avec des pierres d'aimant. Mais on découvrit bientôt que l'action de l'aimant s'accélère et s'accentue par la friction. Ce procédé a l'inconvénient de ne donner qu'une aimantation faible et irrégulière, parce que le pôle d'aimant développe un champ magnétique d'intensité faible et variable, et de produire des points conséquents, surtout si la lame à aimanter est un peu longue et d'un acier un peu dur.

2° *Procédé de la touche séparée.* — On place les deux pôles

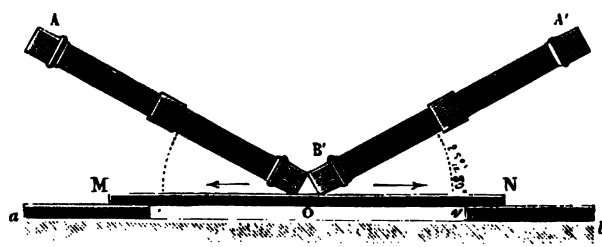


Fig. 716.

contraires de deux barreaux d'égale force au milieu du barreau à aimanter, et on les fait glisser simultanément chacun vers un des bouts du barreau, en les tenant inclinés, chacun, sous un *angle de 25° à 30°* (*fig.* 716). On ramène ensuite chaque aimant

vers le milieu du barreau, et l'on recommence de la même manière. Après plusieurs frictions semblables sur les deux faces, le barreau est aimanté.

On accélère et l'on augmente l'aimantation en plaçant les deux bouts du barreau à aimanter sur les pôles contraires *b* et *a'* de deux aimants fixes *ab* et *a' b'* dont l'influence s'ajoute aux actions des aimants mobiles AB et A' B'. Le barreau frotté acquiert des pôles M et N, de noms contraires aux pôles B, B', A, A' des aimants influents.

Ce procédé donne l'aimantation la plus complète et la plus régulière; aussi est-il appliqué de préférence aux aiguilles de boussole et aux lames minces dont l'épaisseur ne dépasse pas 5 millimètres.

Duhamel étudia ce procédé en 1760 et le perfectionna au point qu'on l'appelle souvent *procédé de Duhamel*. Il plaça les aimants inducteurs au-dessus de la lame, et non au-dessous, ce qui rend la manœuvre plus commode, et en les inclinant sur l'horizon.

3° *Procédé de la double touche.* — Le meilleur de ces anciens

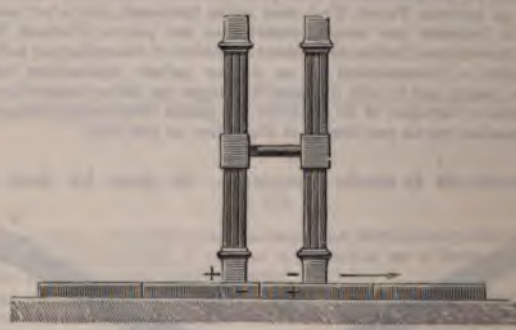


Fig 717.

procédés d'aimantation était celui de la double touche, indiqué pour la première fois, en 1751, par Mittchell [1].

Les deux aimants sont encore placés au milieu du barreau à aimanter, leurs pôles contraires en regard; mais ils sont maintenus à une distance fixe, au moyen d'une cale non magnétique placée entre eux (fig. 717). On les fait glisser ensemble depuis

1. Ce procédé est signalé dans son *Treatise on artificial magnets* (Cambridge, 1751).

le milieu jusqu'à une extrémité, puis de celle-ci à l'autre extrémité, et ainsi de suite, de manière que chaque moitié du barreau reçoive le même nombre de frictions. Le champ magnétique d'influence était considérablement renforcé, dans l'intervalle des deux pôles, par leur action simultanée.

Æpinus, en 1758, perfectionna cette méthode en plaçant, comme dans le procédé de la touche séparée, deux forts barreaux sous celui qu'on veut aimanter, et en inclinant les barreaux mobiles d'un angle de 15 à 20 degrés (fig. 718). Ce procédé est le plus

Fig. 718.

énergique de tous, et peut servir à aimanter de forts barreaux; mais il donne souvent des points conséquents.

793. **Aimantation par l'action de la terre.** — Le magnétisme terrestre tend constamment à produire l'aimantation dans le fer et dans l'acier. Ainsi une barre de fer doux, ou même d'acier non trempé, s'aimante lorsqu'on la place dans le méridien magnétique, parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, tandis qu'une barre d'acier non trempé n'est nullement influencée.

Toutefois on n'a ainsi qu'une aimantation instable; car si l'on retourne la barre, les pôles sont aussitôt intervertis et, si on l'écarte du méridien magnétique, le magnétisme disparaît complètement. Cependant on parvient à donner au fer doux une force coercitive sensible, si, tandis qu'il est sous l'influence de la terre, on le soumet à une action mécanique brusque et intense, telle qu'une forte torsion ou un martelage à froid sur une enclume. Mais la force coercitive ainsi développée est faible et se perd bientôt complètement : ce qui n'a pas lieu pour l'acier.

Remarque. — C'est par l'influence prolongée du magnétisme terrestre qu'on explique la formation des aimants naturels, ainsi que l'aimantation spontanée qu'on observe fréquemment dans les vieux outils et autres objets d'acier ou de fer, tels que les clous, les pelles, les pinces, etc. La fonte a une grande force coercitive et s'aimante très bien.

794. **Aimants composés** ou **Faisceaux magnétiques.** — On appelle *aimant composé* ou *faisceau magnétique* un ensemble de barreaux aimantés réunis parallèlement par leurs pôles de même nom. La force d'un pareil aimant est de beaucoup plus intense que celle d'un aimant d'une seule pièce qui aurait les mêmes dimensions.

Tantôt on leur donne la forme de fer à cheval (fig. 719 et 720), tantôt une forme rectiligne (fig. 720 et 722). Le faisceau représenté dans la figure 720 est formé de 4 lames d'acier juxtaposées. Celui de la figure 719 se compose de 12 lames disposées en trois couches de 4 lames chacune. La forme de fer à cheval est préférable pour faire porter un poids à l'aimant, car les deux pôles sont utilisés en même temps. Dans les deux espèces de faisceaux, les lames sont trempées et aimantées séparément, puis superposées et réunies par des vis de fer, ou par des viroles de laiton.

Fig. 719.

795. Armures des aimants. — On nomme *armures* des pièces de fer doux, telles que A et B (fig. 720), qu'on laisse perpétuellement en contact avec les pôles des aimants, et qui ont pour effet d'en conserver le magnétisme, et même de l'augmenter.

La figure 721 représente une pierre d'aimant munie de ses armures sur les faces qui correspondent aux pôles. Ce sont deux lames de fer doux, terminées chacune par un talon massif. Ces

Fig. 720.

lames s'aimantent sous l'influence de l'aimant naturel : les pôles A et B de l'aimant naturel font naître dans l'armure des pôles de noms contraires *b* et *a*. Or ces armures, une fois aimantées, réagissent à leur tour sur le magnétisme de l'aimant naturel, et accroissent ainsi sa puissance.

Sans armure, les aimants naturels sont très faibles; mais, *armés*, ils deviennent capables de porter des poids qui aug-

mentent progressivement jusqu'à une certaine limite qu'ils ne peuvent dépasser. On vérifie ce fait en accrochant à l'armure soit un plateau de balance, soit un seau (fig. 770) où l'on peut ajouter progressivement des poids, jusqu'à une limite où il se produit un brusque *arrachement*.

Pour armer les aimants artificiels, on les dispose par paires (fig. 723) en plaçant les pôles contraires en regard, puis on *ferme le circuit magnétique* avec deux petits barreaux de fer doux AB qui conservent les barreaux en empêchant leurs lignes de force de se propager dans l'espace ambiant. Quant aux aiguilles mobiles, comme elles sont soumises d'une manière permanente à l'action directrice du magnétisme terrestre, cela leur tient lieu d'armure.

Fig. 721.

Remarque. — *Portants* ou *contacts*. — Les aimants n'agissent même pas directement par leurs armures, mais par l'intermédiaire d'une autre pièce de fer doux, appelée *portant* ou *contact* (fig. 719, 721 et 723). Le portant $a'b'$ (fig. 722), qui est en fer doux, fait lui-même l'office d'une deuxième armure; car il s'aimante par influence et ses pôles a' et b' réagissent sur les pôles a et b de la première.

796. **Force portative des aimants.** — On apprécie l'aimanta-

Fig. 722.

tion résultante d'un aimant par sa *force portative*, c'est-à-dire par le poids qu'il peut porter.

La force portative d'un aimant, de substance et de poids donnés, est augmentée par l'adjonction d'un contact. L'accroissement grandit pendant un certain temps jusqu'à une certaine limite, puis il s'annule brusquement dès qu'on arrache le contact. Il se produit, dans ce cas, une sorte de condensation de magnétisme analogue à celle que nous étudierons ci-dessous pour *les charges électriques*. La force portative est diminuée après ce

Fig. 723.

à Bernoulli. En appel
et *a* une constante
stance, on a

F

797. **Aimants Jami**
par ses recherches s
tisme dans les barre
résultats relativemen
à l'influence de leu
tacts, et à leur *force*

1° Il a vérifié d'al
tion d'un faisceau m
reculée par l'influe
applique.

Ainsi, un faisceau
portait que 4 kilogr
dépourvu d'armures,
grammes lorsqu'il ét
350 centimètres carr

2° La force portati
l'épaisseur, mais m
portionnalité. Il a d
cier épaisses dont o
les faisceaux magnétiques, des lames très minc
superposées en nombre suffisant.

La figure 723 représente un aimant en fer à ch
cations de Jamin. C'est un faisceau de lames d'a
munies d'armures en fer doux : celles-ci sont sé
et solidement vissées entre elles et avec les lame

Ces aimants ont été formés, lamé par lame à
découvert par Arago.

LIVRE X

ÉLECTRICITÉ STATIQUE[1]

CHAPITRE PREMIER

PRINCIPES FONDAMENTAUX.

798. Définitions. — Historique. — Un grand nombre de substances, quand on les frotte avec un morceau de drap ou avec une peau de chat, acquièrent la propriété d'attirer les corps légers, tels que des barbes de plume, des brins de paille, etc. Cette propriété, découverte d'abord sur l'ambre jaune, fut reconnue plus tard à la cire à cacheter, aux résines, à la gutta-percha, au soufre, au verre, à la soie, à l'ébonite (caoutchouc durci), à la paraffine, à la soie artificielle, qui s'électrise fortement lorsqu'on la frotte avec la main.

Elle peut servir à définir l'électricité. Les corps qui ont acquis cette propriété sont dits *électrisés*, et la cause inconnue de ce phénomène, dit *électrique*, est appelée *électricité*.

Les principales causes qui développent l'électrisation sont le contact, soit simple, soit renforcé par le frottement ou la pression, les actions chimiques, la chaleur, le magnétisme et l'électricité elle-même. Ses effets principaux sont des attractions et des répulsions, des phénomènes lumineux ou calorifiques, des commotions plus ou moins violentes, des réactions chimiques.

Remarques. — 1° *Frottement des liquides et des gaz.* — Un corps solide peut aussi s'électriser quand il est frotté avec un liquide ou un gaz. Il suffit de plonger une baguette de verre dans du mercure pour l'électriser. De même, dans

1. On trouvera dans les Livres X et XI, qui constituent un Traité abrégé d'Électricité, les expériences nouvelles les plus élémentaires du Cours d'Électricité que M. G. Lippmann a professé à la Sorbonne pendant l'année 1893. Tous les renseignements, d'ordres expérimental et théorique, nous ont été obligeamment fournis par MM. Cl. Limb et A. Guillet, préparateurs du Cours de *M. Lippmann.*

une fois donnée, les découvertes se succé
les exposerons dans leur ordre chronologi
avec l'ordre logique des principes fondam

799. **Électroscopes.** — On reco
au moyen de petits instruments :

Fig. 724.

l'extrémité inférieure d'une tige métallique terminée en haut par un bouton métallique (fig. 729) : c'est par là qu'on relie le corps électrisé à l'électroscope, à l'aide d'un fil métallique long et fin ou bien par contact direct. Les feuilles d'or divergent si le corps est électrisé.

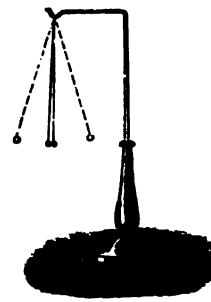


Fig. 726.

Remarque — Si la balle de sureau d'un électroscope ne doit pas conserver sa charge après l'éloignement du corps électrisé, il est préférable de ne pas l'isoler.

800. Conductibilité électrique. — Lorsqu'on présente au pendule électrique un bâton de cire à cacheter frotté par un bout, on remarque qu'il n'attire que par ce bout; l'autre bout, qui n'a pas été frotté, ne donne aucun signe d'électrisation. Il en est de même avec un tube de verre, un bâton de soufre, tant qu'ils n'ont pas été frottés dans toute leur longueur. Au contraire, l'expérience montre qu'aussitôt qu'un corps métallique a, dans certaines conditions, acquis sur un de ses points la propriété électrique, instantanément elle se propage sur toute la surface du corps, quelle que soit son étendue.

Il y a donc des substances qui transmettent la propriété électrique et d'autres qui la retiennent fixée sur les points directement électrisés.

Expériences de Gray. — Ce fait fut découvert par Gray, en 1727. Il remarqua d'abord que, si l'on frottait un tube de verre creux fermé par un bouchon de liège, celui-ci prenait la propriété électrique, bien qu'il fût incapable de l'acquérir lorsqu'on le frottait directement, mais en le tenant à la main. Il généralisa ce fait par une expérience célèbre. Il attacha au bouchon une corde de chanvre dont la longueur était de 765 pieds et il la tendit horizontalement en la suspendant par des rubans de soie au plafond de la salle. Toutes les fois qu'on frottait le tube de verre, on voyait l'action électrique s'exercer sur toute l'étendue de la corde.

801. Corps bons conducteurs et corps mauvais conducteurs. — On dit que les corps, tels que les métaux, qui transmettent la propriété électrique, *conduisent bien l'électricité*, ou qu'ils sont des corps *bons conducteurs*, et que les autres *conduisent mal l'électricité*, ou qu'ils sont des corps *mauvais conducteurs* ou *isolants*.

Cette classification des corps ne doit pas être regardée comme absolue. Il n'y a pas de corps *parfaitement* conducteurs, c'est-à-dire *transportant* l'électricité à toute distance et instantanément

ni de corps *absolument isolants*, c'est-à-dire opposant une résistance complète à la propagation de l'électricité. En réalité, les corps sont *plus ou moins* conducteurs et *plus ou moins* isolants. De plus, le degré de conductibilité, pour une même substance, dépend de sa température et de son état physique. Le verre, qui est très mauvais conducteur à la température ordinaire, conduit assez bien lorsqu'il est chauffé au rouge. De même la gomme laque et le soufre deviennent conducteurs lorsqu'on les chauffe.

Corps idioélectriques et anélectriques. — C'est à cause de la grande conductibilité des métaux qu'on ne peut les électriser directement, à moins qu'on n'ait soin de les isoler préalablement et de les frotter avec un corps non conducteur. Dans ces conditions, les métaux s'électrisent aussi bien que les corps mauvais conducteurs. Pour le démontrer, on fixe un tube de laiton à un manche de verre ou de paraffine (fig. 727), et, tenant ce dernier à la main, on frotte

Fig. 727.

le métal avec un morceau de soie ou de taffetas ciré; en l'approchant ensuite d'un électroscope, on constate qu'il est électrisé. Si l'on tenait directement le métal à la main, on ne verrait pas le moindre signe d'électrisation; cependant il y aurait bien encore production d'électricité par le frottement, mais elle se perdrait immédiatement dans le sol.

Ce fait général explique l'ancienne classification des corps, faite par Gilbert, en *idioélectriques*, c'est-à-dire pouvant s'électriser (c'étaient les corps isolants), et en *anélectriques*, c'est-à-dire incapables de s'électriser (c'étaient les corps conducteurs).

802. Isoloirs, réservoir commun. — Les corps mauvais conducteurs servent d'*isoloirs*, c'est-à-dire de supports destinés à conserver aux corps conducteurs leur électricité en les *isolant* du sol. La terre étant formée de substances plus ou moins bonnes conductrices, aussitôt qu'un corps conducteur électrisé communique avec elle par un autre conducteur, l'électricité s'y écoule immédiatement; en d'autres termes, l'électricité qui chargeait primitivement le conducteur, charge après communication établie le conducteur beaucoup plus grand formé par le corps et la Terre. On isolera donc un corps soit en le soutenant sur des pieds de verre, soit en le suspendant à des cordons de soie, ou bien en le posant sur un gâteau de résine, ou mieux de paraffine très propre [1]. Toutefois il n'existe pas d'*isoloirs parfaits*; les corps les plus mauvais conducteurs n'isolent jamais complètement, et tout

1. M. D. Hurmuzescu a récemment proposé un isolant nouveau, constitué par une sorte de combinaison de soufre et de paraffine : il joint au pouvoir isolant de la paraffine l'avantage d'être assez dur pour pouvoir être travaillé au tour. (*Laboratoire des recherches physiques.*)

corps électrisé perd toujours plus ou moins lentement son électricité par les supports.

On n'a pas à se préoccuper de la vapeur d'eau tant qu'elle est dans l'air. M. Boudréaux a démontré en effet que la déperdition est occasionnée, non pas par la vapeur atmosphérique, mais par l'eau condensée à la surface des supports de verre [1].

803. Distinction de deux électricités. — Il existe *deux modes différents d'électrisation*, ou, comme on dit, *deux espèces d'électricités* : les corps *se repoussent* ou *s'attirent*, suivant qu'ils sont chargés de la *même électricité*, ou d'*électricités différentes*.

Lorsqu'on présente au pendule électrique un bâton de verre frotté avec un morceau de drap, il y a *attraction* d'abord, puis *répulsion* après le contact. Les mêmes effets se produisant avec un bâton de cire à cacheter frotté de la même manière, il semble que l'électricité développée sur le verre soit identique avec celle de la résine. Mais si, pendant que le pendule électrique est repoussé par le verre électrisé, on en approche la résine frottée, celle-ci attire vivement la balle de sureau; de même, si au pendule repoussé par la résine électrisée on présente le verre frotté, on observe une forte attraction : donc *un corps repoussé par l'électricité du verre est attiré par l'électricité de la résine*; et réciproquement, *un corps repoussé par l'électricité de la résine est attiré par celle du verre*.

Dufay [2], qui découvrit ce fait en 1734, l'expliqua en admettant que ces deux corps sont dans *deux états électriques différents*, c'est-à-dire qu'il y a *deux modes d'électrisation distincts*, ou encore qu'il existe *deux espèces d'électricités* : l'une qui se développe sur le verre quand on le frotte avec de la laine, l'autre qui se développe sur la résine ou sur la cire d'Espagne quand on les frotte avec un morceau de drap ou une peau de chat. Il nomma la première *électricité vitrée*, et la seconde *électricité résineuse*.

804. Production simultanée des deux électricités. — Lorsqu'on cherche à produire de l'électricité en frottant deux corps l'un contre l'autre, rien ne distingue à priori le corps frottant du corps frotté; aussi est-il logique d'admettre que, si l'un s'électrise, l'autre s'électrisera en même temps. C'est ce que l'expérience a vérifié.

Le frottement ou *le simple contact développe toujours simultané-*

1. *Expérience de M. Hurmuzescu.* — Un électroscope à feuilles d'or, dont le bouton métallique était encastré dans l'isoloir de M. Hurmuzescu, est resté chargé *des mois entiers* dans une atmosphère qui était pourtant *saturée de vapeur* par la présence d'une couche d'eau sur le plateau-support de l'appareil. (*Laboratoire des Recherches physiques.*)

2. *Membre de l'Académie des sciences.*

Fig. 728.

troscope, que verre et mercure ont pris
tions opposées.

805. **Électrisation par frottement.** -
nomène de l'électrisation par frottement
sur les corps frottés dépend de la natur
le verre poli, frotté avec de la laine, se c
et la résine, frottée de la même manièr
résineuse. Inversement, la laine frottée

l'autre, , deux rubans de soie blanche pris dans la même pièce, celui qui est frotté transversalement s'électrise vitreusement, l'autre résineusement.

On voit donc que les dénominations d'électricité vitrée et d'électricité résineuse ne correspondent à rien de réel, puisque le verre peut se charger d'électricité résineuse, et la résine d'électricité vitrée. Nous pouvons les remplacer dès à présent par les noms d'électricité *positive*, correspondant à la première, et d'électricité *négative*, correspondant à la seconde.

806. **Équivalence des électricités contraires développées simultanément.** — Lorsqu'on réunit, par un contact intime, deux corps qui s'étaient chargés, par leur frottement réciproque, d'électricités contraires, on constate que leur ensemble ne produit ni attraction, ni répulsion, ni aucun autre effet. Par conséquent, *les deux électricités développées sur deux corps frottés sont en proportion telle, que, lorsqu'on les réunit, leurs effets s'annulent mutuellement.*

En effet, si dans l'expérience précédente (fig. 728), la baguette de verre est replongée dans le mercure, les feuilles de l'électroscope reviennent au contact.

On peut donc en conclure que les charges développées par le frottement sur deux corps en contact *sont égales*, ou du moins *équivalentes*, puisqu'elles ne sont pas identiques. Cette expérience justifie, indépendamment de toute théorie, les noms de *positive* et de *négative* adoptés pour désigner deux charges électriques dont la *somme* paraît égale à *zéro* : c'est ce qu'on appelle souvent une *couche double*.

Fig. 729.

807. **Influence électrique.** — Un plateau métallique P, monté sur une colonne de paraffine V (*fig. 729*), est en communication avec un électroscope E.

placé à grande distance. Dès qu'on approche de P un corps électrisé S, on constate la divergence des feuilles d'or de l'électroscope.

Donc un corps électrisé est capable d'en électriser un autre à distance. C'est là le phénomène de l'*influence électrique*, qui sera étudié plus loin en détail.

On donne le nom d'*inducteur*, ou mieux de *corps influençant*, au corps S primitivement électrisé; le plateau P est le corps *induit* ou *influencé*.

808. **Théorie de l'électrisation.** — Tous les faits précédents sont purement expérimentaux, et indépendants de toute espèce de théorie. De nombreuses hypothèses ont été proposées pour les expliquer : deux seulement sont restées dans la science, celle de Franklin et celle de Symmer.

1° *Hypothèse de Franklin.* — Franklin admit pour cause de l'électricité un fluide unique, impondérable, agissant par répulsion sur ses propres molécules et par attraction sur celles de la matière. Tous les corps contiendraient, *à l'état neutre*, une quantité déterminée de ce fluide : si celle-ci augmente, les corps sont électrisés *positivement*; si elle diminue, les corps sont électrisés *négativement*. (Telle est l'origine des expressions *positive* et *négative* que nous avons substituées, plus haut, aux noms vagues et impropres de *vitrée* et de *résineuse*.) L'électricité positive se représente par le signe + et l'électricité négative par le signe —. Cette appellation et cette notation sont justifiées par ce fait que, de même qu'en algèbre, en ajoutant $+a$ à $-a$ on a zéro, de même, en donnant à un corps qui possède déjà une certaine quantité d'électricité positive, une quantité égale d'électricité négative, on le ramène à l'état neutre.

2° *Hypothèse de Symmer.* — Franklin ayant le premier donné une théorie complète de la bouteille de Leyde (851), fondée sur l'hypothèse d'un seul fluide, celle-ci fut d'abord généralement admise par les physiciens et par Dufay lui-même. Cependant, des objections sérieuses y ayant été faites, surtout par Æpinus, le physicien anglais Symmer proposa l'hypothèse de deux fluides électriques agissant chacun par répulsion sur lui-même et par attraction sur l'autre. Ces fluides existeraient, en quantité indéterminée, dans tous les corps à l'état de combinaison, formant ce qu'on appelle le *fluide neutre* ou *naturel*. Différentes causes, le contact, le frottement, les actions chimiques, etc., peuvent les séparer, et c'est alors qu'apparaissent les phénomènes électriques; mais ces fluides ont une grande tendance à se réunir pour former à nouveau du fluide neutre. Symmer donna aux deux fluides électriques les noms de fluide vitré et de fluide résineux, corres-

pondants aux deux modes d'électrisation découverts par Dufay.

Remarque. — Ni l'une ni l'autre de ces hypothèses n'est suffisante pour relier et coordonner entièrement les innombrables découvertes de l'électricité moderne. D'ailleurs les fluides électriques, comme tous les autres fluides des anciens physiciens, disparaissent devant l'hypothèse moderne de l'unité des agents physiques et devant la théorie mécanique des phénomènes naturels. Cependant l'hypothèse de Symmer, malgré son insuffisance, est commode pour l'interprétation élémentaire des phénomènes, et même pour leur explication mathématique. Nous conserverons donc, dans l'exposition des phénomènes électriques, les expressions d'électricité *positive* et d'électricité *négative*, à la condition de n'y pas attacher l'idée primitive de *fluides*, mais le sens expérimental d'états particuliers de la matière qui sont sensibles et mesurables par leurs effets [1].

CHAPITRE II

MESURE DES FORCES ÉLECTRIQUES. — LOIS DE COULOMB.

809. **Lois des attractions et des répulsions électriques.** — Les actions mutuelles entre les corps électrisés, de petites dimensions par rapport à la distance qui les sépare, sont soumises aux deux lois suivantes, connues sous le nom de *lois de Coulomb*.

1° Loi des distances. — *Les répulsions et les attractions qui s'exercent entre deux corps électrisés varient en raison inverse du carré de leur distance.*

2° Loi des masses. — *A distance égale, ces mêmes forces sont proportionnelles au produit des masses électriques (c'est-à-dire des quantités d'électricité) répandues sur les deux corps.*

810. **Vérification expérimentale des lois de Coulomb.** — Ces deux lois ont été découvertes par Coulomb, qui les démontra par deux méthodes : 1° la méthode de la balance de torsion; 2° la méthode des oscillations. Comme ces lois sont

1. On consultera avec fruit, pour ces principes fondamentaux, deux leçons du cours de M. Mascart, *rédigées* par M. Berson, et publiées par la Revue *scientifique (4 février et 13 mai 1882)*.

fondamentales en électricité, nous allons en indiquer la vérification par la balance de torsion.

1° *Description de la balance.* — L'appareil est contenu dans une cage cylindrique de verre de 35 cm de diamètre (fig. 730), sur le contour de laquelle est

Fig. 731.

Fig. 730.

collée une bande de papier qui porte une graduation en 360 degrés. La cage est fermée par un plateau de verre A, au centre duquel s'élève un tube *d* de même matière. Ce tube n'est point fixé invariablement au plateau, mais peut tourner librement sur lui-même. A sa partie supérieure est une garniture de laiton formée de deux pièces (fig. 731), l'une *b* fixée au tube, l'autre *k* s'engageant dans la première au moyen d'une douille, afin que par le bouton *t* on puisse la tourner à volonté. La pièce *k* est un petit *tambour* dont la base supérieure porte un cadran *e*, divisé en 360 degrés, qu'on appelle le *micromètre*. A la pièce *b* est adapté un indicateur *a*, qui sert de point de repère pour mesurer la rotation du cadran et par suite celle du tambour. Au centre de celui-ci et au-dessous du bouton *t* est attaché un fil d'argent très fin qui porte une aiguille de gomme laque *p*, terminée à un bout par une petite boule *n*. Enfin le plateau de verre est percé d'un trou *r* par où l'on peut introduire dans la cage une tige de verre *i*, servant d'isoloir à une boule de laiton *m*.

2° *Principe de la méthode.* — La méthode de mesure est fondée sur l'une des lois de la torsion, — préalablement déterminées par Coulomb : *Les réactions mécaniques produites par la torsion dans un fil métallique se réduisent à un couple dont le moment est proportionnel à l'angle de torsion du fil.*

Ce couple est appelé couple de torsion et la valeur de son moment, pour un angle d'écart à l'unité, est le coefficient de torsion du fil.

Le fil d'argent dont se servait Coulomb avait 0,035 mm de diamètre. Son coefficient de torsion était égal à 0,269 (l'unité de force étant le milligramme et l'unité de longueur étant le centimètre) : 0,269 mmg était donc la force qui, appliquée à un bras de levier égal à 1 cm, tordait le fil d'un angle égal à l'unité trigonométrique. Or, l'aiguille de Coulomb ayant 10,8 cm de longueur, pour tordre de 1° le fil de la balance, il suffisait d'appliquer à l'extrémité une force égale à 0,000438 mmg.

3° *Réglage de l'instrument.* — On enlève la boule fixe, après l'avoir placée en face du zéro (en faisant tourner le couvercle supérieur).

On amène le trait de repère du tambour en face du 0° de la graduation de la cage après avoir amené le 0° du tambour au-dessus du repère. On amène l'aiguille devant le 0° de la cage. On tourne la pince, de manière que la balle de sureau se fixe en face du 0°, *sans torsion.*

Lorsqu'on replace la boule fixe, elle déplace un peu la balle de sureau.

Quand la balance est réglée, tous les zéros se trouvent dans un même plan vertical qui contient l'aiguille de gomme laque et le fil (sans torsion) (fig. 732).

4° *Vérification de la loi des répulsions.* — On introduit la boule fixe, *électrisée.* Elle électrise d'abord, puis repousse la boule mobile usqu'en A_1, à une distance angulaire α. Le fil subit alors une torsion égale à α, d'où résulte une force antagoniste qui fait équilibre à la force répulsive (fig. 732). C'est la première expérience. — On tourne alors le tambour supérieur, *en sens inverse de la déviation*, de manière à diminuer l'angle d'écart et à le réduire à la valeur α'. Supposons qu'il ait fallu, pour cela, tourner le micromètre d'un angle N'. En ce moment l'angle de torsion n'est plus α, mais $N' + \alpha'$, et par suite le moment de torsion est $c\,(N' + \alpha')$. Cela constitue une deuxième expérience. On en fera une troisième en réduisant l'écart, de la même manière, jusqu'à la valeur α''. Il faudra, pour cela, tourner le micromètre d'un angle N''; la nouvelle torsion sera $(N'' + \alpha'')$ et son moment sera $c\,(N'' + \alpha'')$.

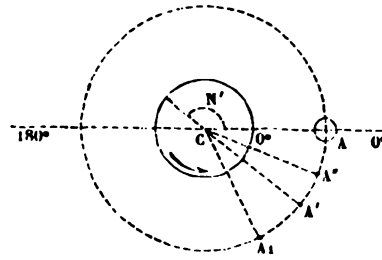


Fig. 732.

5° *Résultats numériques de Coulomb.* — L'angle de répulsion initial des deux boules fut 36° : l'angle de torsion était également 36°. Puis l'angle d'écart fut réduit à $\frac{1}{2}$ 36° : il fallut tourner le tambour de 126°. L'angle de torsion était donc 126 + 18 = 144°. Puis l'écart fut réduit à 9° par une rotation de 567°, à partir du 0°. (En réalité c'était 8°30' au lieu de 9°.) Donc l'angle de torsion était (567 + 9°) = 567°. Ce sont là les seuls nombres publiés par Coulomb.

Voici comment il les appliquait à la vérification de ses lois. Il comptait d'abord les distances, non pas sur les cordes des arcs, mais sur les arcs eux-mêmes. Par conséquent, ces distances étaient représentées par les nombres 36, 18 et 9.

Quant aux forces répulsives, il les représentait par les nombres mêmes qui représentent les torsions successives. On voit que dans ces conditions les nombres ci-dessus vérifient la loi, puisque, lorsque les distances sont

$$36 \ldots 18 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{2}36 \qquad \text{et} \qquad 9 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{4}36,$$

les forces répulsives deviennent

$$36 \ldots 144 \text{ ou } 2^2 \times 36 \ldots 576 \text{ ou } 4^2 \times 36.$$

6° *Discussion des expériences de Coulomb.* — On peut se rendre compte de la légitimité des approximations de Coulomb en appliquant à ses nombres une vérification rigoureuse.

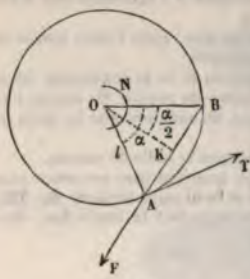


Fig. 733.

Soient B la boule fixe, A la boule mobile. Nous ne considérons que les centres des deux boules, ce qui revient à supposer que les masses électriques de ces boules sont condensées en leurs centres. Nous verrons plus loin (833, 5°) que cette hypothèse est légitime. C'est ce que faisait Coulomb. Il plaçait l'œil dans le plan vertical défini par l'aiguille et par le centre de chaque boule, et il notait l'azimut de ce plan (fig. 733).

Soient α l'angle d'écart et $(N + \alpha)$ la torsion totale.

L'équilibre de l'aiguille peut être assimilé à celui d'un corps solide mobile autour d'un axe fixe vertical (on admet que les composantes des forces électriques dirigées suivant le rayon OA sont incapables de déranger le fil de sa position verticale). Les forces qui se font équilibre sont F et le couple de torsion : *la somme de leurs moments* (par rapport à l'axe de rotation O) *doit donc être nulle.* Or on a

$$\text{Moment de F} = \text{F.OK} = \text{F}.\,l \cos\frac{\alpha}{2},$$

$$\text{Moment du couple de torsion} = c\,(\text{N} + \alpha).$$

L'équation d'équilibre est donc

$$[1] \qquad \text{F}.\,l \cos\frac{\alpha}{2} = c\,(\text{N} + \alpha).$$

Si nous admettons la loi de Coulomb, nous avons, en appelant f l'action à l'unité de distance (et posant $d = \text{AB}$),

$$[2] \quad \text{F} = \frac{f}{d^2} = \frac{f}{4\,l^2 \sin^2\frac{\alpha}{2}}, \quad \text{d'où} \quad [3] \quad \frac{f}{4\,lc} = (\text{N} + \alpha) \sin\frac{\alpha}{2} \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}.$$

Appliquons à cette équation les résultats numériques de Coulomb. Comme f est invariable pour une même charge initiale des deux boules, le second membre de l'équation doit être constant et nous devons avoir, en égalant entre eux les premiers membres,

$$36 \sin 18^\circ \operatorname{tang} 18^\circ = (126 + 18) \sin 9^\circ \operatorname{tang} 9^\circ = (567 + 9) \sin 45^\circ \operatorname{tang} 45^\circ.$$

En faisant le calcul, on obtient les nombres 3,614, 3,568 et 3,169, qui sont *sensiblement* constants.

Remarque. — Beaucoup d'expériences de vérification ont été faites depuis celles de Coulomb. Mais aucune série ne présente des nombres plus approchés

que ceux de Coulomb, malgré les précautions qu'ont prises les divers expérimentateurs pour éviter les causes d'erreur, à savoir : *La déperdition de l'électricité des boules par l'air et par les supports; L'influence réciproque des masses électriques répandues sur les deux boules ou produites par induction sur les organes de la balance;* Enfin les *erreurs de lecture.*

811. **Vérification de la loi des masses.** — Coulomb *admettait à priori*, par raison de symétrie, que deux sphères égales, dont l'une est électrisée et l'autre à l'état neutre, prennent des charges égales lorsqu'on les met en contact. Il admettait de plus l'*invariabilité de la charge initiale.*

Il introduisait une boule fixe électrisée, qui électrisait par contact la boule mobile. Celle-ci était d'abord au 0° sans torsion. Elle était repoussée à une certaine distance. Coulomb réduisait l'écart à $\alpha^\circ (= 2^\circ)$, grâce à une torsion du micromètre supérieur. Il touchait alors la boule avec une boule égale. — La répulsion diminuait, puisque la charge de la boule fixe était devenue moitié moindre. Pour maintenir la boule mobile à la distance α, il fallait donc une torsion moindre. Coulomb tournait le micromètre en sens inverse de manière à réduire la torsion totale à $N' + \alpha$ et il constatait que

$$N' + \alpha = \frac{N + \alpha}{2}.$$

On peut faire une autre expérience en touchant de nouveau la boule fixe électrisée avec une boule égale et neutre, et en ramenant l'écart à la même valeur α : on constate que la nouvelle torsion

$$N'' + \alpha = \frac{N + \alpha}{4},$$

en même temps que la charge, est devenue *le quart* de la charge initiale.

812. **Loi élémentaire des actions électriques.** — Il résulte des expériences de Coulomb que deux petites sphères électrisées A et A′ s'attirent, ou se repoussent, en raison inverse du carré de leur distance et en raison directe du produit de leurs charges.

La loi des distances ne se vérifie qu'autant que la distance des centres des sphères reste toujours très grande par rapport à leurs rayons. La Terre et le Soleil ne sont que des points si on les compare à la distance qui les sépare. Si l'on suppose que, les charges des deux sphères restant constantes, leurs rayons diminuent de plus en plus, la loi s'applique toujours à des distances de plus en plus faibles. On peut en induire que la loi serait encore vraie *à la limite*, c'est-à-dire pour des *points électrisés* situés à une distance r infiniment petite. C'est ce qu'on exprime en disant que la *loi de Coulomb* est la *loi élémentaire* des actions électriques.

813. **Expression mathématique de la loi de Coulomb. — Unité de quantité d'électricité** ou **Unité de charge électrique — *Coulomb.*** — *Si l'on* appelle φ l'action qu'exerce une masse électrique *égale à l'unité* sur une masse électrique égale placée à

l'unité de distance, l'action f, exercée à la distance d par une masse q sur une masse q', sera évidemment donnée par la formule

$$[1] \qquad f = \varphi \cdot \frac{qq'}{d^2}.$$

Si les deux masses sont de même signe, la force est *positive*, et c'est une répulsion; elle est *négative* dans le cas d'une attraction.

Si $q' = q$, $f = \varphi \frac{q^2}{d^2}$, d'où l'on déduit $q = d\sqrt{\frac{f}{\varphi}}$.

Le nombre qui exprime q dépend donc des unités adoptées pour évaluer les longueurs et les forces.

Unité C. G. S. de quantité d'électricité, — Coulomb. — On conçoit donc que l'on puisse rapporter les masses électriques aux unités de masse, de longueur et de temps adoptées dans le système C. G. S. L'unité de quantité d'électricité, ainsi définie, s'appelle *unité absolue*. Dans la pratique, on lui substitue une autre unité de quantité, *dix fois plus petite*, à laquelle on a donné le nom de *coulomb*[1].

On évalue donc pratiquement les *quantités d'électricité* en *coulombs*, de même qu'on évalue les longueurs en mètres, ou les masses en kilogrammes.

Unité électrostatique de quantité d'électricité. — On peut simplifier l'équation [1] par un choix convenable de l'unité d'électricité. Si l'on définit l'unité d'électricité *la quantité d'électricité qui exerce, à l'unité de distance, sur une quantité égale, une répulsion égale à l'unité de force*, on aura évidemment

$$\varphi = 1 \qquad \text{et} \qquad f = \frac{qq'}{d^2}. \qquad [2]$$

Telle est l'*unité électrostatique* de quantité d'électricité; un coulomb vaut 3×10^9 unités électrostatiques.

814. Force électrique. — Champ électrique. — Lorsqu'une masse électrique q, concentrée en un point A, se trouve dans le voisinage d'un système de points électrisés, soit isolés comme le point A, soit réunis de manière à constituer un corps conducteur unique, elle subit une attraction ou une répulsion de la part de

1. Pour rappeler la mémoire du physicien français Coulomb.

chacun des points du système. Toutes ces actions sont des forces concourantes qui ont une résultante unique. C'est cette résultante, attractive ou répulsive, qu'on appelle *force électrique au point* A.

La force électrique en un point varie évidemment, en grandeur et en direction, avec la position du point par rapport au système électrisé. La portion de l'espace où la force électrique, provenant de ce système, a une valeur appréciable, s'appelle *champ électrique* du système.

On appelle *intensité du champ électrique en un point* la valeur de la force attractive ou répulsive qui s'exercerait en ce point sur l'*unité d'électricité positive*.

Lorsque la force électrique a la même direction en tous les points d'une certaine région, on dit que le champ est *uniforme* dans cette région. On démontre (833, 1°) que, dans ce cas, l'intensité du champ y est aussi constante.

815. **Composantes de la force en un point du champ électrique.** — On peut déterminer par le calcul l'intensité du champ en un point quelconque, et par suite la grandeur et la direction de la force électrique qui s'y exerce. Soient M le point et q sa charge, et soient q_1, q_2..., les masses électriques disséminées aux points A_1, A_2... dont les actions constituent le champ, et r_1, r_2..., leurs distances respectives au point M. Les forces qui concourent en ce point sont

$$\frac{qq_1}{r_1^2} = f_1, \qquad \frac{qq_2}{r_2^2} = f_2 \ldots.$$

Soient trois axes de coordonnées rectangulaires. Décomposons chaque force f suivant ces axes (fig. 734).

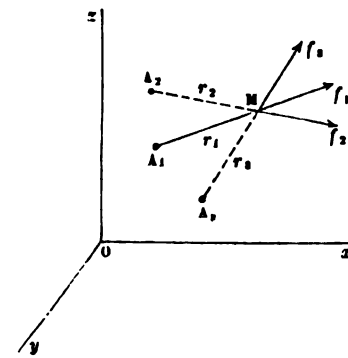


Fig. 734.

Les composantes sont $f_1 \cos \alpha_1$, $f_1 \cos \beta_1$, $f_1 \cos \gamma_1$, en appelant α_1, β_1, γ_1 les angles de la force f_1 avec les axes. En appelant x, y, z les coordonnées du point M, et x_1, y_1, z_1 celles du point A, on a

$$\cos \alpha_1 = \frac{x - x_1}{r_1}, \qquad \cos \beta_1 = \frac{y - y_1}{r_1}, \qquad \cos \gamma_1 = \frac{z - z_1}{r_1}.$$

Les composantes sont donc

$$\frac{qq_1(x - x_1)}{r_1^3}, \qquad \frac{qq_1(y - y_1)}{r_1^3}, \qquad \frac{qq_1(z - z_1)}{r_1^3},$$

r_1 étant défini par l'équation

$$r_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2.$$

En effectuant la même décomposition pour chaque force, on aura :

pour la somme des composantes suivant l'axe des x $\quad X = \sum \frac{qq_1(x - x_1)}{r_1^2}$,

— — — y $\quad Y = \sum \frac{qq_1(y - y_1)}{r_1^2}$,

— — — z $\quad Z = \sum \frac{qq_1(z - z_1)}{r_1^2}$.

Enfin la force électrique résultante sera donnée par la diagonale du parallélépipède construit sur X, Y, Z; elle a pour valeur $R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$.

On calculera de même l'action exercée sur le point M par un corps ou par une série de corps électrisés, conducteurs ou non conducteurs. Il suffira de décomposer chacun de ces corps en éléments de volume *infiniment petits*, au moyen de trois systèmes de plans parallèles aux plans des coordonnées, et l'on considérera X, Y, Z comme les sommes des composantes provenant de chacun de ces éléments de volume électrisés.

CHAPITRE III

DISTRIBUTION ET DÉPERDITION DE L'ÉLECTRICITÉ.

816. **Distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs.** — Coulomb a été conduit par l'expérience, et Poisson par le calcul, au fait fondamental suivant :

Lorsqu'un corps, conducteur et isolé, est électrisé, l'électricité libre, positive ou négative, se porte exclusivement à sa surface extérieure.

1° *Vérification expérimentale directe.* — Il existe plusieurs expériences de vérification ; voici celle du cours de M. Lippmann :

On prend une sphère creuse de cuivre S, isolée sur un pied de paraffine P, et ouverte à sa partie supérieure (fig. 735). L'orifice peut être exactement fermé par un couvercle c qui complète la sphère et au-dessous duquel une boule de cuivre B est suspendue par un fil de soie blanche. En opérant ainsi on réalise le cas d'un conducteur creux complètement fermé, dont il est cependant possible d'explorer l'intérieur. Après avoir électrisé la sphère S en

la mettant en contact avec une source électrique, on la touche *intérieurement* avec la boule B. Il suffit pour cela d'incliner le support P. On enlève alors le couvercle et la boule B au moyen d'un crochet isolant V, puis on décharge le couvercle en le touchant avec une boule métallique qui est reliée au sol, par l'intermédiaire d'un fil métallique *f* et d'une conduite d'eau par exemple. On approche alors le système d'un électroscope et l'on constate que celui-ci reste au zéro. Mais si, au contraire, on touche *extérieurement* la sphère avec la boule B, on recueille de l'électricité; car, présentée alors à l'électroscope, B produit une divergence des feuilles d'or. Donc il n'y a d'électricité libre qu'à la surface externe.

Fig. 735.

Conséquence. — Deux sphères de même rayon pleines ou creuses, l'une conductrice et l'autre isolante, prendront la même charge dans les mêmes conditions lorsque la sphère isolante aura été métallisée superficiellement.

2° *Démonstration à priori.* — En partant de la loi de Coulomb, on démontre, par le calcul, *qu'il ne peut y avoir d'électricité libre à l'intérieur d'un corps conducteur.*

Réciproquement, cette conséquence de la loi de Coulomb, étant elle-même démontrée directement par l'expérience, peut servir à son tour à vérifier indirectement la loi. Et, en effet, en partant du fait de la distribution de l'électricité à la surface des conducteurs, on peut retrouver par le calcul — ainsi que l'a montré M. Joseph Bertrand — les lois de Coulomb.

817. **Densité électrique.** — On est donc conduit à admettre que l'électricité libre forme une couche extrêmement mince à la surface des corps électrisés. Elle y est retenue par le pouvoir isolant de l'atmosphère ambiante et elle tend sans cesse à s'en échapper, avec un effort plus ou moins grand.

On nomme *densité électrique* la *quantité d'électricité* répandue *sur l'unité de surface*, en supposant une distribution uniforme.

Densité moyenne et *Densité en un point.* — Dans le cas d'une distribution variable, on définit d'abord la *densité moyenne* en un point : c'est le rapport de la charge électrique d'une petite surface, prise autour de ce point, à cette surface; la limite vers laquelle tend ce rapport, quand la surface considérée tend vers zéro, s'appelle la *densité électrique* au point considéré. C'est un coefficient *théorique*, tandis que la densité moyenne est un coefficient *expérimental*.

Tension électrique. — L'électricité répandue sur une surface donnée exerce en chaque point sur le milieu ambiant un effort pour se dégager. Cet effort est égal à la résultante des actions répulsives que la couche électrique totale répandue sur le conducteur exerce sur la charge du point considéré et cette résultante est appliquée au conducteur. En effet, si l'on électrise une surface conductrice *déformable*, telle qu'un filet à papillon ou un ballon de baudruche doré, etc., on la voit se gonfler vers l'extérieur.

On démontre que cette résultante est une force *normale* à la surface du conducteur : une bulle de savon sphérique se dilate, en effet, par électrisation *en restant sphérique*, ce qui n'aurait évidemment pas lieu si la tension était oblique ou variait d'un point à l'autre. On démontre aussi qu'elle est *proportionnelle au carré de la densité électrique* en chaque point : 2π étant le facteur de proportionnalité, on a donc $T = 2\pi\sigma^2$, en désignant par σ la densité électrique et T la tension au point considéré (833, 3°).

818. **Expériences de Coulomb.** — Coulomb a déterminé la densité électrique aux différents points d'un conducteur électrisé en équilibre.

1° *Méthode.* — Sa méthode consistait à toucher le point considéré à l'aide du *plan d'épreuve* : c'était un disque métallique, aussi petit que possible, fixé à l'extrémité d'un support isolant.

M. Boudréaux a perfectionné le *plan d'épreuve* en le constituant par un disque D, — clinquant ou aluminium —, collé sur la base d'un cylindre de paraffine P muni lui-même d'un manche en ébonite E (fig. 736).

En appliquant le disque D en un point d'un conducteur, il se substitue à la surface de celui-ci à l'endroit touché, et enlève *très vraisemblablement* une quantité d'électricité proportionnelle à la charge de l'élément en contact. Coulomb mesurait cette quantité en portant le plan d'épreuve dans sa balance. De la répulsion *observée* f il déduisait la charge q du plan d'épreuve par la formule

$$q = a\sqrt{f}.$$

2° *Résultats généraux.* — Coulomb a constaté par l'expérience que *la densité électrique en un point d'un conducteur isolé est proportionnelle à la quantité totale d'électricité distribuée sur toute la surface,* et que *le rapport des densités électriques en deux points d'un conducteur est indépendant de la charge totale.*

3° *Influence de la forme des corps.* — Sur une sphère métallique, la densité électrique est la même en chaque point de la surface. On prévoit, à priori, qu'il doive en être ainsi, à cause de la forme symétrique du conducteur (fig. 737).

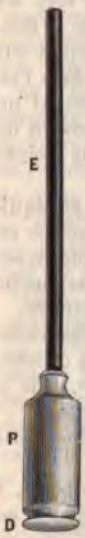


Fig. 736.

Fig. 737.

Fig. 738.

Si le corps électrisé est un ovoïde allongé (fig. 738), la densité électrique cesse d'être uniforme; l'électricité, obéissant toujours à sa propre répulsion, s'accumule vers les parties les plus aiguës *a*, où elle acquiert une densité maximum.

Dans le cas d'un ellipsoïde parfait (fig. 739), la densité de cette couche, aux extrémités des axes, est proportionnelle à leur longueur.

Dans le cas d'un disque de métal, c'est sur les bords que s'accumule l'électricité.

Dans le cas d'un cylindre terminé par deux hémisphères, *c'est à la surface* de ces derniers que la densité est maximum.

Fig. 739.

Pouvoir des pointes. — On nomme pouvoir des pointes la pro-

priété que possèdent les pointes *conductrices* de laisser écouler l'électricité. Cette propriété, découverte par Franklin, est une conséquence de la distribution de l'électricité à la surface des conducteurs allongés. En effet, la densité électrique croissant en raison inverse de la courbure, l'électricité doit s'accumuler vers les pointes : sa tension, qui est proportionnelle au carré de la densité, croît donc encore plus rapidement et l'emporte bientôt sur la résistance de l'air; c'est alors que le fluide s'échappe dans l'atmosphère. Si l'on approche la main de la pointe, on ressent un léger souffle, dû à la répulsion de l'air, et si le dégagement de l'électricité a lieu dans l'obscurité, on remarque sur la pointe une aigrette lumineuse.

819. **Action d'un conducteur chargé d'électricité en équilibre.** — L'électricité répandue à la surface d'un conducteur en équilibre peut y avoir une densité ou constante ou variable en ses divers points. Quand la densité est constante, on dit que la couche est *homogène* : c'est le cas d'une sphère conductrice électrisée.

L'action d'une couche homogène sur une masse d'électricité concentrée en un point, soit intérieur, soit extérieur à la couche, peut se déduire des lois de Coulomb. Elle est déterminée, dans le cas de conducteurs sphériques, par les théorèmes suivants :

I. *Point intérieur. — L'action d'une couche sphérique homogène sur un point intérieur est nulle.*

Autrement dit, une masse électrique concentrée en un point, à l'intérieur d'une couche sphérique homogène, est toujours en équilibre (833, 5°).

II. *Point extérieur. — L'action d'une couche sphérique homogène sur un point extérieur est la même que si la masse électrique de la couche était accumulée au centre de la sphère.*

III. Les deux théorèmes s'appliquent encore au cas d'une sphère électrisée pleine, pourvu qu'elle soit formée de couches concentriques et homogènes.

820. **Action protectrice d'une enceinte conductrice. — Chambre de Faraday.** — Une charge électrique en équilibre, si intense qu'elle soit, répandue à la surface extérieure d'un conducteur creux, est sans action sur tout autre conducteur qui serait placé à l'intérieur du premier.

Faraday démontra expérimentalement cette conséquence curieuse, en s'enfermant lui-même, avec des appareils propres à révéler la présence de l'électricité, dans une grande chambre à parois métalliques, portée sur des supports isolants. Les parois de la chambre ayant été fortement électrisées, ni l'opérateur ni les appareils ne manifestèrent la moindre trace d'électrisation. La

chambre électrisée agissait au contraire sur les conducteurs extérieurs.

Remarque. — Un tissu métallique, à mailles plus ou moins serrées, peut remplacer la paroi continue de la chambre de Faraday : une enceinte métallique en fil de fer, telle qu'une cage métallique, constitue, pour les corps placés à son intérieur, une enceinte protectrice contre les effets de l'électricité ambiante. Elle peut être isolée ou en communication avec le sol.

821. **Communication et distribution de l'électricité sur les corps en contact.** — Lorsqu'on met en contact deux corps conducteurs, l'un électrisé et l'autre à l'état neutre, il y a partage de l'électricité entre les deux corps, dans un rapport qui dépend de celui de leurs surfaces et aussi de leurs formes ; et lorsqu'on les sépare, l'un a gagné, l'autre a perdu de l'électricité sur tous ses points. S'ils ne sont pas conducteurs, il n'y a perte ou gain que sur les points en contact.

Ainsi, Coulomb a constaté, par sa méthode du plan d'épreuve, que sur des sphères métalliques isolées, mises d'abord en contact, puis électrisées dans cet état, l'électricité se distribue diversement à leurs surfaces, suivant le rapport des diamètres. Si ces diamètres sont égaux, la densité électrique est nulle au point de contact, ne devient sensible qu'à 20 degrés de ce point, croît rapidement de 20 à 30 degrés, plus lentement de 60 à 90, et reste à peu près la même de 90 à 100.

Si les diamètres sont dans le rapport de 2 à 1, la densité, qui est encore nulle au point de contact, est d'abord plus considérable sur la grande sphère; mais elle augmente ensuite plus rapidement sur la petite, et à 180 degrés du point de contact, c'est sur celle-ci qu'a lieu la plus forte densité électrique.

822. **Déperdition de l'électricité.** — Les corps électrisés, si bien isolés qu'ils soient, perdent toujours plus ou moins rapidement leur électricité. C'est un phénomène généralement inévitable et continu, qui limite l'accumulation de l'électricité sur les conducteurs ainsi que la précision des mesures électrostatiques. M. Édouard Branly a démontré que les radiations violettes et ultraviolettes influent sur la déperdition de l'électricité.

La gomme laque brune et l'ébonite peuvent servir à la construction d'isoloirs ; mais le verre, qui est *hygroscopique*, doit être desséché avec soin. La paraffine, dont l'emploi a été préconisé par M. Boudréaux, est peut-être l'isolant le plus parfait. Nous avons dit que M. Hurmuzescu avait donné à cet isolant de la plasticité et de la dureté en le combinant au soufre en certaine proportion.

CHAPITRE IV

CONSÉQUENCES DES LOIS DE COULOMB. — NOTIONS FONDAMENTALES SUR LE POTENTIEL ÉLECTRIQUE.

823. Potentiel d'un conducteur électrisé : Définition expérimentale. — L'expression de *potentiel électrique* fut introduite dans la science par Green, en 1828. Elle correspond à une propriété de l'électricité nettement distincte de celles que nous avons étudiées, ou indiquées plus haut, sous les noms de *charge* ou *masse électrique*, de *densité* et de *tension*.

On peut donner une définition *expérimentale* du potentiel électrique dans le cas d'un *corps conducteur* isolé, chargé d'une certaine couche d'électricité en équilibre. Cette définition résulte des deux faits suivants.

1er Fait. — Si l'on touche le conducteur en différents points avec un plan d'épreuve, et qu'on porte le plan, après chaque contact, dans la balance de Coulomb, on constatera chaque fois, en général, une répulsion différente. Cela prouve que *la densité électrique n'est pas en général la même* aux différents points du conducteur, bien que celui-ci soit dans un état électrique permanent invariable. Mais si, à l'aide d'un fil métallique très long et très fin, on relie un point quelconque du corps à la petite boule fixe d'une balance de Coulomb, la boule mobile, — préalablement chargée de la même électricité, — subira une certaine répulsion, mesurée par un certain angle d'écart. Or, si l'on relie un autre point quelconque du conducteur, *on constatera toujours la même répulsion*. Cette force de répulsion est donc caractéristique de l'état électrique du conducteur. C'est un caractère analogue à celui que donne un thermomètre lorsqu'on le plonge dans une région quelconque d'un corps uniformément échauffé.

Si l'on a eu soin de prendre pour plan d'épreuve une sphère ayant pour rayon 1 centimètre et de la mettre en communication avec un point quelconque du conducteur électrisé, par l'intermédiaire d'un fil *long et fin*, la charge que prend cette boule dans ces conditions mesure par définition le *potentiel* du conducteur (en supposant que tout autre conducteur soit éloigné de la *boule*).

2e Fait. — Soient deux corps A et B électrisés positivement, ayant pour potentiels respectifs V_a et V_b : supposons $V_a > V_b$.

Mettons ces corps en communication par deux points quelconques à l'aide d'un fil métallique long et fin. On constatera, — par le même procédé expérimental, — que le potentiel de A diminue et que le potentiel de B augmente jusqu'à ce qu'ils aient atteint l'un et l'autre une valeur commune V', intermédiaire entre V_a et V_b[1].

Expériences. — On peut réaliser ces expériences[2] en électrisant deux conducteurs sphériques A et B, l'un de rayon R et l'autre de rayon 2R, dont les surfaces sont S et 4S. Si on leur donne des charges Q et Q', qui soient dans le même rapport que leurs surfaces, *la densité électrique sera la même* sur les deux conducteurs, puisqu'on a

$$\delta = \frac{Q}{S} \qquad \text{et} \qquad \delta' = \frac{4Q}{4S}.$$

On pourra s'en assurer par l'expérience en touchant, avec le plan d'épreuve, deux points quelconques M et N des deux conducteurs. Mais, si l'on met les deux conducteurs en communication par un fil métallique long et fin, reliant les deux points M et N, on constatera qu'il passe de l'électricité de la grande sphère sur la petite : cela tient à ce que le potentiel sur la grande sphère est *plus élevé* que sur la petite.

Conclusion. — Ainsi, toutes les fois qu'un conducteur électrisé, relié à un autre conducteur, cède ou prend de l'électricité positive à ce dernier, c'est qu'il a un potentiel *plus* ou *moins élevé* que lui ; toutes les fois qu'il n'y a pas transmission d'électricité de l'un à l'autre, c'est que le potentiel est le même sur tous les deux.

La notion de potentiel correspond donc à une propriété de l'électricité qui joue, dans les échanges d'électricité entre deux conducteurs, le même rôle que la *force élastique des gaz* ou que la *pression hydrostatique des liquides* dans les échanges de gaz ou de liquides entre deux récipients, ou enfin que la *température* dans les échanges de chaleur. C'est à cause de cette analogie qu'on

1. Pendant la durée de l'état variable du potentiel, il y a passage d'électricité de A en B, c'est-à-dire du corps qui a le potentiel le plus élevé sur celui qui a le potentiel le moins élevé : le fil conducteur est alors le siège d'un *courant électrique* qui cesse dès que l'égalisation du potentiel s'est établie. L'équilibre se rétablit dès que l'électricité s'est distribuée sur les deux conducteurs de manière à rendre leurs potentiels égaux.

2. On *peut, au point de vue qualitatif,* substituer à la balance de Coulomb un *électroscope à feuilles d'or et à bouchon de paraffine* tel que celui de la *figure 729.*

donne quelquefois au potentiel électrique les noms de *niveau électrique*, ou de *température électrique*.

Remarques. — 1° *Différences de potentiels.* — La rupture de l'équilibre électrique peut seule donner lieu aux phénomènes du courant : donc ces phénomènes ont pour raison d'être des *différences de potentiels*, à condition qu'ils s'effectuent entre des conducteurs indépendants, chargés et en équilibre électrique.

2° *Potentiel zéro.* — Pour exprimer les différences de potentiels, on prend le potentiel du sol comme terme de comparaison.

Tout conducteur qui, étant mis en communication avec le sol, ne donne naissance à aucun courant, est dit *au potentiel zéro*.

3° *Potentiel positif* et *potentiel négatif.* — Il est *à un potentiel positif* si, étant *mis à la terre*, tout se passe comme si la terre lui enlevait de l'électricité positive. Il est *à un potentiel négatif* si elle lui fournissait de l'électricité positive[1].

3° Un corps peut être chargé d'électricité bien qu'étant au potentiel zéro. C'est, le cas, par exemple, d'un conducteur, en communication avec le sol, dont on approche un corps électrisé.

824. **Définition mathématique du potentiel électrique en un point.** — On ne peut définir mathématiquement d'abord le *potentiel d'un conducteur électrisé*. On doit commencer par définir le *potentiel en un point*.

Le cas le plus simple est celui d'un point M qui se trouve dans un *champ électrique* réduit lui-même à une masse électrique q, concentrée en un autre point A qui serait situé à une distance r du point M.

On appelle *potentiel en un point* M le rapport de la masse agissante q à sa distance r au point M, *qu'on suppose chargé de l'unité d'électricité positive* (fig. 740). On le désigne ordinairement par la lettre V, et l'on écrit

$$V = \frac{q}{r},$$

Fig. 740.

Fig. 741.

V étant positif ou négatif suivant que la masse électrique agissante est positive ou négative.

1. On a l'habitude de rapporter le sens des échanges d'électricité au mouvement de l'électricité positive.

823. Propriétés du potentiel. — Cette fonction possède les propriétés suivantes :

I. *Expression du champ électrique. — Si l'on prend le rapport* $\left(\frac{\Delta V}{\Delta r}\right)$ *de l'accroissement* ΔV *de la fonction* V *à l'accroissement* Δr *de la variable* r, *et qu'on fasse tendre* Δr *vers zéro, le rapport* $\frac{\Delta V}{\Delta r}$ *tend vers une limite, qui, prise en signe contraire, représente en grandeur et en signe la force électrique en ce point.*

En effet, si la charge q est positive, elle exerce en M (fig. 741), sur une masse positive égale à 1, une force répulsive représentée par $F = \frac{q}{r^2}$ F étant positif.

Or le potentiel en M est positif et égal à $\frac{q}{r}$; si l'on donne à r l'accroissement Δr, le potentiel devient $\frac{q}{r + \Delta r} = V + \Delta V$ et l'on a

$$\frac{\Delta V}{\Delta r} = \frac{1}{\Delta r}\left(\frac{q}{r + \Delta r} - \frac{q}{r}\right) = \frac{-q}{r^2 + r\Delta r}.$$

En faisant tendre Δr vers zéro, le dénominateur tend vers r^2 et l'on a

$$\lim. \frac{\Delta V}{\Delta r} = \frac{-q}{r^2}, \qquad \text{d'où} \qquad -\left(\lim. \frac{\Delta V}{\Delta r}\right) = \frac{q}{r^2} = F.$$

Remarque. — On arriverait au même résultat en considérant une masse q d'électricité négative[1].

II. *Composantes du champ électrique.* — Le système des points A et M étant rapporté à trois axes rectangulaires, Ox, Oy, Oz (fig. 742), le point M sera défini par trois coordonnées x, y, z et le point A par trois autres coordonnées x_1, y_1, z_1 ; la distance r de ces deux points sera donnée par la formule connue

$$r = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}.$$

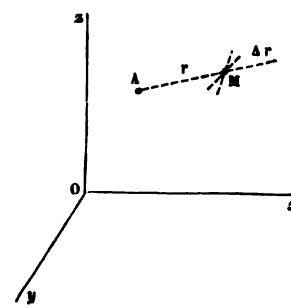


Fig. 742.

Par conséquent, le potentiel V du point M, qui est une fonction de r, sera nécessairement une fonction des trois coordonnées x, y, z. Si l'on donne à r un accroissement Δr, les coordonnées prendront des accroissements correspondants Δx, Δy, Δz. De même qu'on a considéré le rapport $\frac{\Delta V}{\Delta r}$, on pourra considérer l'un des rapports $\frac{\Delta V}{\Delta x}$, ou $\frac{\Delta V}{\Delta y}$, ou $\frac{\Delta V}{\Delta z}$. De même qu'on a calculé

1. *La limite du rapport* $\frac{\Delta V}{\Delta r}$ est ce qu'on appelle la dérivée de la fonction V *par rapport à la variable* r.

la limite du rapport $\frac{\Delta V}{\Delta r}$ quand on fait tendre Δr vers zéro, on pourra calculer les limites correspondantes des rapports $\frac{\Delta V}{\Delta x}$, $\frac{\Delta V}{\Delta y}$, $\frac{\Delta V}{\Delta z}$.

Cela posé, si l'on veut obtenir la composante de la force électrique qui s'exerce en M, suivant l'une quelconque des directions Ox, Oy, Oz, on n'aura qu'à appliquer la propriété suivante du potentiel :

La limite du rapport $\frac{\Delta V}{\Delta x}$, prise en signe contraire, représente en grandeur et en signe la composante de la force électrique suivant la direction Ox.

On aura donc

$$F_x = -\lim. \left(\frac{\Delta V}{\Delta x}\right).$$

On aurait de même

$$F_y = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta y} \qquad \text{et} \qquad F_z = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta z},$$

en appelant F_x, F_y, F_z les composantes de la force F suivant les directions Ox, Oy, Oz.

On a en effet

$$[1] \qquad F_x = \frac{q(x - x_1)}{r^3}.$$

Or, si l'on calcule, par le procédé indiqué précédemment, $\frac{\Delta V}{\Delta x}$, on trouve

$$[2] \qquad \lim. \frac{\Delta V}{\Delta x} = -\frac{q(x - x_1)}{r^3}.$$

En comparant les équations [1] et [2], on a donc

$$F_x = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta x}. \qquad \text{C. Q. F. D.}$$

On aurait de même

$$F_y = \frac{q(y - y_1)}{r^3} = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta y} \quad \text{et} \quad F_z = \frac{q(z - z_1)}{r^3} = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta z}.$$

Remarque. — Le potentiel permet donc de trouver, non seulement la valeur de la force électrique au point considéré, mais encore les composantes de cette force suivant une direction quelconque.

III. *Expression du travail électrique — Le travail effectué par la force électrique, pour déplacer l'unité d'électricité positive entre deux points M et M' du champ, est représenté par la variation (prise en signe contraire) du potentiel entre ces deux points.*

On a donc

$$W = -(V' - V).$$

Si l'on imagine que l'unité de masse positive se déplace dans le champ, de M en M', sous l'action de la force électrique (fig. 741), celle-ci exécute un travail qu'il est facile d'évaluer. Il suffit d'appliquer la définition relative au travail d'une force variable en grandeur et en direction, qui serait de la forme $f = \frac{q}{r^2}$, travail qui est égal à la somme des travaux des composantes F_x, F_y, F_z.

dont la direction est constante. En appelant r et r' les distances des points M et M', on trouve, tout calcul fait,

$$W = q\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'}\right).$$

Or on a

$$V = \frac{q}{r} \quad \text{et} \quad V' = \frac{q}{r'}; \qquad \text{donc} \qquad W = -(V' - V). \qquad \text{C. Q. F. D.}$$

On a ainsi une signification *mécanique* de la différence de potentiel entre deux points, qui est la même si on augmente d'une même quantité C le potentiel en tous les points du champ considéré, car cette constante C s'élimine dans la différence.

IV. *Signification du potentiel dans le cas où l'on fait* $C = 0$. — Si le point M', au lieu d'être un point voisin de M, s'éloignait jusqu'à l'infini, on aurait $r' = \infty$ et par suite $V' = 0$, puisque V' est toujours égal à $\frac{q}{r'}$. On a alors, d'après l'équation précédente, $W = V$. On peut donc dire alors que *le potentiel en un point est* numériquement *égal au travail qu'effectuerait la force électrique en ce point pour repousser l'unité d'électricité positive, depuis* M *jusqu'à l'infini.*

Ce travail serait évidemment le même, *en valeur absolue*, si la force attirait l'unité de masse positive depuis l'infini jusqu'au point considéré.

Remarque. — On pourrait, comme on le fait quelquefois, prendre cette propriété du potentiel pour définition : on en déduirait alors, comme propriété, la formule $V = \frac{q}{r}$.

826. Potentiel en un point dû à un système quelconque de masses électriques. — Nous avons examiné jusqu'ici le cas où le *champ électrique* est constitué par une seule masse électrique agissante; de ce cas simple on passe naturellement à celui d'un champ électrique constitué par un nombre quelconque de masses électriques agissantes. Ces masses peuvent être distinctes, ou bien réunies en un conducteur unique électrisé.

La définition du potentiel est la même : il est égal à la somme des quotients $\frac{q}{r}, \frac{q'}{r'}, \frac{q''}{r''}, \ldots$, qui correspondent à chacune des masses agissantes sur le point M. On a donc

$$V = \frac{q}{r} + \frac{q'}{r'} + \frac{q''}{r''} + \cdots = \Sigma \frac{q}{r}.$$

Chacun des termes de cette somme est positif ou négatif, suivant la nature de l'électricité concentrée au point correspondant, et le potentiel est la somme algébrique de ces quotients[1].

1. Dans le cas où les masses électriques sont distinctes, on obtient le potentiel en faisant une *simple somme* algébrique. Dans le cas où le fluide occupe une *surface continue, de forme géométrique* définie, on calcule en général le potentiel *à l'aide des procédés du Calcul intégral.*

Les propriétés du potentiel sont exactement les mêmes dans le cas d'un système de masses électriques que dans le cas d'une seule masse agissante : c'est la cause de la généralité de cette notion.

La force électrique en M est la résultante des forces concourantes qui proviennent des diverses masses (fig. 743).

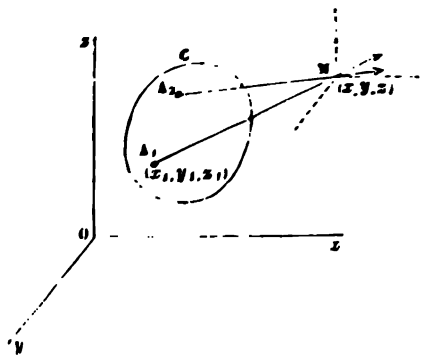


Fig. 743.

Les composantes X, Y, Z de la force électrique suivant les trois axes sont encore :

$$F_x = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta x},$$

$$F_y = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta y},$$

$$F_z = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta z}.$$

Car la limite du rapport $\frac{\Delta V}{\Delta x}$ est égale à la somme des limites des accroissements des fonctions partielles $\frac{q}{r}$ qui composent la fonction totale V ou $\Sigma \frac{q}{r}$; or la première de ces limites partielles représente la projection sur l'axe des Ox de la force électrique correspondante, et F_x est précisément la somme de ces projections. Il en est de même pour F_y et pour F_z.

827. Surfaces équipotentielles ou surfaces de niveau. — Étant donné un conducteur électrisé (fig. 744) d'une certaine forme C, les divers points de l'espace ambiant n'ont pas le même potentiel par rapport à ce conducteur ; mais on peut supposer l'espace partagé en surfaces géométriques sur lesquelles le potentiel a la même valeur en tous les points : chacune de ces surfaces est appelée *surface équipotentielle* ou *surface de niveau*, par rapport au système électrique donné ; la valeur du potentiel ne varie que lorsqu'on passe d'une surface équipotentielle à une autre.

Par exemple, si le conducteur électrisé se réduit à un point, les surfaces de niveau sont des sphères concentriques à ce point.

Propriété des surfaces équipotentielles. — [illegible]

[illegible]

$$F_x = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta x}, \quad [illegible]$$

par ΔV l'accroissement de potentiel correspondant. Or la tangente à la surface au point M tend à se confondre avec la surface elle-même : par suite, l'accroissement de potentiel suivant la tangente tend à se confondre avec l'accroissement de potentiel suivant une ligne de la surface. Mais, par définition, tout accroissement de potentiel suivant une ligne quelconque de la surface est *nul*, puisque la surface est équipotentielle. On a donc

$$\Delta V = 0$$

et $$-\lim. \frac{\Delta V}{\Delta x} = 0,$$

et par suite

$$F_x = 0.$$

Il en serait de même de toute autre composante de la force suivant une direction quelconque qui serait tangente à la surface au point M : donc la force est perpendiculaire sur toutes les tangentes autour du point considéré et, par suite, *normale* à la surface.

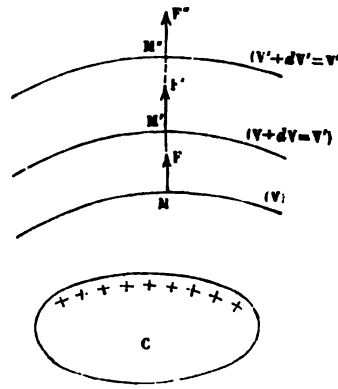


Fig. 745.

828. **Lignes de force.** — Imaginons une série de surfaces de niveau infiniment voisines. En un point M de la première (fig. 745), la force est dirigée suivant la normale. Celle-ci coupe la seconde surface en un point M'; en ce point la force est encore normale, et ainsi de suite. La série de ces éléments infiniment petits de normale forme une courbe : c'est ce qu'on appelle une *ligne de force*. Elle est définie par cette propriété qu'*en chacun de ses points la force électrique est tangente à la courbe.*

En chaque point de l'espace il passe une *ligne de force*, ainsi qu'une *surface équipotentielle.*

Étant donné un système quelconque de masses électriques, leurs actions attractives ou répulsives s'exercent à des distances infinies, dans l'espace ambiant. Mais à une certaine distance, variable avec la quantité d'électricité, ces actions deviennent négligeables.

829. **Condition d'équilibre électrique sur un conducteur.** — *L'équilibre électrique ne peut exister sur un conducteur électrisé que si tous ses points ont le même potentiel.*

En effet, soient deux points M, M' dans un champ électrique. Supposons qu'ils fassent partie d'un même conducteur et qu'ils aient des potentiels différents V et V'. On sait que le travail développé par la force électrique pour transporter l'unité d'électricité positive de M en M' est égal à $-(V'-V)$. Donc, en appelant F la composante du champ, sur l'élément Δe du déplacement, on a

$$V - V' = \Sigma F e.$$

De l'hypothèse $V \gtrless V'$, il résulte que le champ n'est pas nul; et, comme le conducteur ne peut opposer aucune résistance au mouvement du fluide, l'action du champ déterminera une nouvelle décomposition de fluide. Il ne peut donc y avoir équilibre que si $V - V' = 0$, c'est-à-dire si $V = V'$.

Conséquence. — La surface d'un conducteur électrisé en équilibre est elle-même une *surface de niveau*. On peut même dire que le volume limité par cette surface est un volume de niveau. C'est par cette propriété que le potentiel d'un conducteur a été défini expérimentalement (823).

850. Potentiel des conducteurs électrisés. — Lorsqu'un conducteur électrisé est *isolé* dans l'espace, c'est-à-dire que *les corps environnants sont assez éloignés pour ne pas l'influencer*, son potentiel dépend uniquement de la charge électrique répandue sur sa propre surface. Lorsque la charge est en équilibre, son potentiel est le même pour tous ses points : celui de l'un quelconque d'entre eux est ce qu'on appelle le *potentiel du conducteur*. Ce fait est du reste démontré par l'expérience du § 823 : car la déviation des feuilles d'un électroscope reste invariable lorsque le fil de communication prend contact en un point quelconque de la masse du conducteur électrisé en équilibre, bien qu'il n'y ait pas d'électricité libre en ce point, et qu'un plan d'épreuve n'en pourrait prendre aucune trace.

Pour une sphère métallique électrisée isolée dans l'espace, on aura le potentiel en calculant la fonction pour le centre. Si R est le rayon, on a

$$V = \Sigma \frac{q}{R} = \frac{q + q' + q'' \ldots}{R} = \frac{Q}{R}.$$

Dans le cas contraire, on doit tenir compte de toutes les charges électriques distribuées dans l'espace lorsqu'on calcule le potentiel V d'un conducteur.

Remarque. — On voit qu'en adoptant la définition mathématique, une sphère de rayon 1 qui aurait une charge égale à l'unité aurait un potentiel égal à l'unité.

851. Expression de la densité en un point d'un conducteur électrisé en équilibre. — La couche électrique qui recouvre un conducteur en équilibre forme donc une surface de niveau. Mais si la composante tangentielle de la force électrique est nulle pour un point quelconque de la couche, la composante normale a une valeur bien déterminée en chaque point, car *c'est la force électrique elle-même*. L'électricité, répandue à la surface d'un conducteur, en est donc repoussée normalement en chaque point, et elle n'est maintenue à la surface que par le milieu ambiant.

Cas d'une sphère. — La couche d'électricité est homogène ; et, si l'on appelle σ la densité, R le rayon de la sphère, Q la charge, on a d'une part

$$[1] \qquad F = \frac{Q}{R^2} \quad \text{et} \quad Q = 4\pi R^2 \sigma, \qquad [2]$$

d'où l'on déduit

$$[3] \qquad F = 4\pi\sigma \quad \text{et} \quad \sigma = \frac{1}{4\pi} \cdot F.$$

Cas d'un conducteur quelconque. — La formule [3] est générale et s'applique à un conducteur de forme quelconque. Dans le cas général, la force F en un point peut s'exprimer en fonction de la variation du potentiel. Soit V' la valeur du potentiel sur une surface de niveau infiniment voisine de celle du conducteur, et soit e la portion de normale comprise entre les deux surfaces. On a, comme on l'a vu précédemment,

$$F = -\frac{V' - V}{e}.$$

En portant cette valeur dans l'équation [3 *bis*], il vient

$$\sigma = -\frac{1}{4\pi} \cdot \frac{V' - V}{e}.$$

852. Flux de force. — 1° *Définition.* — On appelle *flux de force*, relatif à une surface S immergée dans un champ électrique, la somme des produits de chacun de ses éléments de surface par la projection de l'intensité du champ en chaque point sur la normale à l'élément.

Ce flux a pour expression

$$\sum F.\Delta S \cos(F, N).$$

Chacun des termes algébriques $F.\Delta S \cos(F, N)$ est pris conventionnellement avec le signe + ou le signe —, suivant que le champ va de la surface vers l'extérieur ou vers l'intérieur.

2° *Expressions diverses du flux élémentaire* $F.\Delta S \cos(F, N)$. — Si le champ F (fig. 746), au point où se trouve l'élément A, est produit par la charge m située à la distance r, on a, d'après la loi de Coulomb,

$$F = \frac{m}{r^2}, \quad \text{donc le flux élémentaire} \quad F\Delta S \cos(F, N) = \frac{m}{r^2} \cdot \cos(F, N).\Delta S.$$

Or le produit $\Delta S.\cos(F, N)$ est égal à la projection AC de l'élément AB sur la sphère AC décrite de m comme centre avec mA pour rayon; donc, en posant $AC = \Delta\sigma$,

$$F\Delta S.\cos(F, N) = m\frac{\Delta\sigma}{r^2}.$$

Fig. 746.

En désignant par $\Delta\omega$ la portion de la sphère décrite de m comme centre avec un rayon égal à l'unité) qui est découpée par le cône de sommet m et de base ΔS, on a, en raison de la similitude,

$$\frac{\Delta\omega}{1} = \frac{\Delta\sigma}{r^2},$$

et, par conséquent, $$F\Delta S \cos(F, N) = m\Delta\omega.$$

La surface sphérique $\Delta\omega$ est, par définition, l'*angle solide* sous lequel l'élément de surface ΔS est vu du point m.

3° Remarque. — *Si le champ provient de plusieurs charges m, m', m'', ..., qui séparément détermineraient en A les champs F, F', F'', ...,* il est clair que

la composante du champ résultant, suivant la normale N, aurait pour expression

$$F\cos(F,N) + F'\cos(F',N) + \ldots,$$

et le flux élémentaire serait alors

$$F.\Delta S.\cos(F,N) + F'\Delta S\cos(F',N) + \ldots = m.\Delta\omega + m'\Delta\omega' + \ldots = \sum m\Delta\omega$$

d'où il suit que le *flux total*, relatif à un système de charges, est égal à *la somme des flux totaux*, relatifs à chacune des charges. Cette addition purement algébrique des flux explique la fécondité des propriétés numériques de cette notion.

833. **Théorème de Gauss.** — *Le flux total relatif à une surface fermée, immergée dans un champ électrique, est égal à* $4\pi\sum m$ ($\sum m$ représentant la somme algébrique des charges enveloppées par la surface).

Il suffit, pour démontrer cette propriété, de calculer les termes qui sont introduits dans la somme $\sum.F.\Delta S\cos(F,N)$, soit par une charge extérieure, soit par une charge intérieure à la surface.

1° *La charge* m *est à l'extérieur.* — Les flux en A et A' (fig. 747) ont la même valeur $m\Delta\omega$, mais ont des signes contraires à cause de la convention ci-dessus (832); donc on a dans ce cas

$$\sum m\Delta\omega = 0.$$

Fig. 747.

En A le champ est plus intense qu'en A'; mais, la surface de l'élément A' étant plus grande, la compensation s'établit pour la valeur des flux à cause de la forme de la loi de Coulomb. Il n'en serait plus de même si l'action électrique variait autrement qu'en raison inverse du carré de la distance.

2° *La charge* m *est à l'intérieur.* — Le flux en A (fig. 747) a pour valeur $m'.\Delta\omega$. En déplaçant A sur la surface S, le signe reste le même, car la charge $+1$ placée en A est constamment repoussée ou constamment attirée, suivant que la charge m' est positive ou négative.

Or $$\sum m'\Delta\omega = m'\sum\Delta\omega;$$

et la somme des $\Delta\omega$, pour toute la surface S, constitue la surface totale 4π de la sphère de rayon 1 qui a m' pour centre : donc le flux relatif à m' a pour valeur

$$m'\sum\Delta\omega = 4\pi m';$$

et, d'après la remarque précédente, les autres charges intérieures donneront de même $4\pi m''$, $4\pi m'''$, ..., en tout

$$4\pi(m' + m'' + m''' + \ldots), \quad \text{c'est-à-dire} \quad 4\pi\sum m.$$

834. **Applications.** — 1° **Tube de force.** — Champ en un point voisin d'un *conducteur.* — Soient deux conducteurs S, S' en équilibre électrique (fig. 747).

et σ la densité électrique sur l'élément ΔS : calculons le champ F en un point M infiniment voisin de la surface.

Comme le conducteur est en équilibre électrique, il fait partie des surfaces équipotentielles du champ. Menons la surface équipotentielle qui passe par M, ainsi que les lignes de force qui s'appuient sur le contour de l'élément ΔS. (L'ensemble de ces lignes de force constitue ce que l'on nomme un *tube de force* pour rappeler que la direction du champ est tangente à ce tube en tout point de la surface.) Prolongeons ce tube à l'intérieur du conducteur et limitons-le par une surface quelconque.

La surface ainsi formée est telle que l'élément parallèle à ΔS donne seul un terme au flux. En effet, en tout point intérieur au corps S le champ est nul, et en tout point de la surface latérale il est tangent à cette surface. Le flux se réduit donc à $F\Delta S$; mais, en vertu du théorème de Gauss, il est aussi égal à $4\pi \sum m$, c'est-à-dire, dans le cas actuel, à $4\pi\sigma\,\Delta S$; donc

$$F.\Delta S = 4\pi\sigma\,\Delta S, \qquad \text{d'où} \qquad F = 4\pi\sigma.$$

2° *Champ en un point de la surface.* — Si on supprime par la pensée l'élément ΔS (fig. 748), il est clair que le champ sera le même en deux points M et M', infiniment voisins et situés de part et d'autre de la surface, car toutes les charges agissantes sont physiquement à la même distance des deux points et d'un même côté. Or l'addition de l'élément ΔS annule l'action en M elle est donc égale à celle qui s'exerçait primitivement en M, mais de signe contraire. Et comme les champs dus à la charge de ΔS en M et M' sont visiblement opposés, les deux actions s'ajoutent sur M' : donc l'action primitive était égale à la moitié de $4\pi\sigma$ ou $2\pi\sigma$.

Tel est par suite le champ dû à la charge du conducteur en un point M'' de sa surface; car on peut diminuer autant qu'on le veut l'étendue de ΔS sans que le raisonnement cesse d'être exact et faire tendre indéfiniment M et M' vers M''.

Fig. 748

3° *Tension en un point.* — La charge totale de ΔS ayant pour valeur $\sigma\Delta S$ et l'action sur l'unité de charge étant $2\pi\sigma$, l'action totale est

$$2\pi\sigma.\sigma\,\Delta S = 2\pi\sigma^2\,\Delta S.$$

Cette force, rapportée à l'unité de surface de densité uniforme σ, a pour valeur $2\pi\sigma^2$: c'est la *tension électrique* en ΔS.

Appliquée à l'élément ΔS du conducteur, elle tend à le soulever et a pour valeur $2\pi\sigma^2\,\Delta S$.

4° *Éléments correspondants.* — En continuant le *tube de force* jusqu'au conducteur S' et le limitant à l'intérieur de S' (fig. 747), le flux total est nul, puisque, en explorant les divers points de la surface, on trouve partout, ou bien un champ tangent (surface latérale), ou bien un champ nul (surface intérieure du conducteur. Si σ' est la densité électrique en $\Delta S'$, le flux a d'ailleurs pour valeur

$$4\pi\,(\sigma.\Delta S + \sigma'\,\Delta S'), \qquad \text{d'où il suit que} \qquad [1] \quad \sigma\Delta S + \sigma'\,\Delta S' = 0.$$

Comme ΔS et $\Delta S'$ sont des quantités essentiellement positives, on voit tout d'abord que les densités σ et σ' sont de signes contraires, c'est-à-dire que les

charges qui apparaissent sur les deux bases du tube ou *éléments correspondants* sont de signe contraire. Elles sont d'autre part égales en valeur absolue, car l'équation [1] donne

$$\sigma\,\Delta S = -\sigma'\,\Delta S', \qquad q = -q'.$$

5° *Action d'une couche sphérique homogène sur un point extérieur ou intérieur.* — Cette action est la même que si toute la charge était condensée au centre.

Si on trace autour d'une sphère conductrice chargée d'une couche M d'électricité en équilibre, une sphère concentrique de rayon R, le champ en tout point de cette sphère aura, par raison de symétrie, la même valeur F et sera dirigé suivant le rayon qui y aboutit : en sorte que le flux qui traverse la surface aura pour valeur

$$\sum F.\Delta S = F\sum \Delta S = F.4\pi R^2.$$

Or, d'après le théorème de Gauss, le flux a aussi pour expression $4\pi M$; donc

$$F.4\pi R^2 = 4\pi M \qquad \text{d'où} \qquad F = \frac{M}{R^2}.$$

Le champ est donc bien le même que si la charge M était au centre de la sphère. Dans le cas d'un point intérieur, le même raisonnement conduit à $F = 0$.

835. **Conducteurs électrisés communicants.** — De la condition d'équilibre d'une couche électrique sur un conducteur on déduit directement une conséquence très importante :

Sur deux conducteurs électrisés, mis en communication à l'aide d'un fil métallique, l'équilibre ne peut exister que lorsque le potentiel est devenu le même partout.

En effet, ces deux conducteurs n'en forment plus qu'un seul, auquel s'applique la condition générale d'équilibre électrique.

Lorsqu'on mettra en communication deux conducteurs de potentiels inégaux, il se fera nécessairement un mouvement de fluide de l'un vers l'autre. Tout se passera comme si le conducteur de potentiel le plus élevé envoyait de l'électricité + au conducteur du potentiel le moins élevé, jusqu'à ce que l'égalisation soit faite. Cette propriété se vérifie par l'expérience et c'est par elle que nous avons généralisé précédemment la définition expérimentale du potentiel.

836. **Capacité électrique.** — *Le potentiel d'un conducteur électrisé en équilibre, et éloigné de tout autre conducteur, est proportionnel à sa charge électrique totale.*

En effet, on a par définition $V = \Sigma\frac{q}{r}$. Par conséquent, le potentiel est une somme de fractions dont chacune a pour numérateur la masse de chacun des points du conducteur. Si chacune de ces masses devient double, triple, quadruple, etc., chaque terme

de la somme sera multiplié dans le même rapport, et il en sera de même de leur somme.

On peut donc poser l'équation

$$\frac{Q}{V} = C, \qquad \text{ou bien} \qquad Q = CV,$$

où Q désigne la charge totale du conducteur, V son potentiel et C une constante qui dépend de la forme et des dimensions du conducteur. Cette constante C s'appelle la *capacité électrique* du conducteur.

Elle est *numériquement* égale à la quantité d'électricité dont il faut charger le conducteur pour lui donner un potentiel égal à 1.

Remarque. — Lorsqu'on met un conducteur en communication avec une source de potentiel constant V, il prend une charge Q complètement déterminée par sa capacité électrique C. De même, lorsqu'on met un certain poids d'une substance en communication avec une source calorifique de température constante T, elle gagne une quantité de chaleur Q complètement déterminée par la capacité calorifique C : on a en effet $Q = CT$.

837. **Unités de capacité électrique : unité absolue** (C. G. S.) et **unité pratique.** — On évalue les capacités électriques à l'aide d'une unité particulière, qui a été rattachée aux unités fondamentales C. G. S. C'est ce qu'on appelle l'*unité absolue* ou l'*unité C. G. S.* de capacité électrique.

Dans la pratique, cette unité serait trop grande pour les usages courants. Aussi lui a-t-on substitué une unité secondaire de capacité, qui vaut $\frac{1}{10^9}$ de l'unité absolue et qu'on appelle le *farad*. On exprime donc les capacités en *farads* ou en *microfarads*, comme on exprime les potentiels en *volts* et les quantités d'électricité en *coulombs*.

838. **Partage de l'électricité entre divers conducteurs. — Équations de l'équilibre électrique.** — Soient un nombre quelconque de conducteurs électrisés en équilibre (nous en prendrons trois comme exemple) dont les capacités sont C', C'', C''' et les potentiels V', V'', V''' : leurs charges Q', Q'', Q''' se trouvent complètement déterminées. Tant qu'ils restent isolés l'un de l'autre, l'équilibre électrique persiste indéfiniment sur chacun d'eux. Si on les met en communication l'un avec l'autre, il se produit un mouvement d'électricité suivi d'un nouvel état d'équilibre. Celui-ci est atteint lorsque le potentiel est devenu le même partout. Il est évident d'ailleurs que la quantité totale d'électricité n'a pas changé : elle est simplement distribuée de manière à égaliser les potentiels. L'*ensemble des conducteurs*, supposés très éloignés les uns des autres, forme *maintenant un conducteur* unique dont la capacité C est égale à la somme des *capacités et la charge totale* à la somme des charges partielles.

On a donc

$$C = C' + C'' + C''' \quad \text{en même temps que} \quad Q = Q' + Q'' + Q'''.$$

Ces deux équations déterminent le nouveau potentiel V, car on a

$$[1] \qquad V = \frac{Q}{C} = \frac{Q' + Q'' + Q''' + \ldots}{C} = \frac{V'C' + V''C'' + V'''C'''}{C' + C'' + C''' + \ldots}.$$

Remarques. — 1° On peut écrire cette équation sous la forme générale

$$V \sum (C') = \sum (V'C'),$$

c'est-à-dire que *le produit du potentiel final par la capacité totale est égal à la somme des produits analogues faits pour chaque conducteur partiel.*

Cette équation rappelle l'équation du mélange des gaz (189), ou celle qu'on obtient en exprimant qu'un système de corps, aux températures respectives V', V'', V''' ... et de capacités calorifiques C', C', C'', ..., étant mélangés dans un récipient adiabatique, ont pris une température commune V à la suite d'un échange de calories.

839. **Conséquences et cas particuliers.** — 1° Pour deux conducteurs électrisés quelconques, l'équation [1] devient

$$[2] \qquad V = \frac{V'C' + V''C''}{C' + C''}.$$

Si les deux charges et les deux capacités sont identiques, on a

$$[3] \qquad V = \frac{2V'C'}{2C'} = V';$$

c'est-à-dire que *le potentiel reste le même.*

Si les deux charges sont égales et de signes contraires, on a

$$[4] \qquad V = \frac{V'C' - V''C''}{C' + C''} = 0, \quad \text{d'où} \quad Q = 2C' \times 0 = 0,$$

c'est-à-dire que *les deux conducteurs isolés dans l'espace sont ramenés à l'état neutre.*

Enfin, si l'un des conducteurs est seul électrisé, on a

$$[5] \qquad V = \frac{Q'}{C' + C''} = \frac{V'C'}{C' + C''} = V' \frac{C'}{C' + C''},$$

et si $C' = C''$,

$$V = \frac{1}{2} V'.$$

Le potentiel varie donc en raison inverse de la capacité.

5° *Méthode de mesure des potentiels.* — Si la capacité C' de l'un conducteurs est très grande par rapport à celle de l'autre, de ière que cette dernière soit négligeable dans leur somme, on

aura, en admettant que le deuxième conducteur soit à l'état neutre,

$$V = V'.$$

Le potentiel ne changera pas.

C'est ce cas particulier qu'on applique dans la mesure expérimentale du potentiel d'un conducteur électrisé au moyen d'une petite sphère (816).

Remarque. — La connaissance du potentiel final et des capacités du système permet de calculer le potentiel initial, à l'aide de l'équation [2].

840. Calcul de l'énergie à dépenser pour charger un conducteur à un potentiel déterminé. — Calculons, par exemple, l'énergie qu'il faut dépenser pour charger un conducteur de capacité C au potentiel V. La charge à lui communiquer a pour valeur $M = CV$. Soit zéro le potentiel initial du conducteur. L'apport de la charge $\frac{M}{n}$, aussi petite que l'on veut, ne donne lieu qu'à un travail négligeable.

Cette charge porte le conducteur au potentiel

$$V_1 = \frac{M}{nC}.$$

Les apports $\frac{M}{n}$ suivants nécessitent les travaux successifs

$$V_1 \cdot \frac{1}{C}\frac{M}{n} \quad \text{ou} \quad \left(\frac{M}{n}\right)^2 \frac{1}{C},\ V_2 \frac{M}{n} \quad \text{ou} \quad \left(\frac{M}{n}\right)^3 \frac{1}{C},\ \text{etc.},$$

si bien que le travail total à dépenser pour la charge aura pour valeur

$$\frac{1}{C}\left(\frac{M}{n}\right)^2 [1 + 2 + 3 + \ldots + (n-1)]$$

ou

$$\frac{M^2}{n^2} \cdot \frac{1}{C}\,\frac{n(n-1)}{2} = \frac{M^2}{2C}\left(1 - \frac{1}{n}\right).$$

Si on fait tendre n vers l'infini afin de rendre les considérations précédentes rigoureuses, puisqu'on opère alors d'une manière absolument continue, on a

$$W = \frac{M^2}{2C} = \frac{1}{2}MV = \frac{1}{2}CV^2, \qquad \text{car} \qquad M = CV.$$

Cette énergie est l'*énergie électrique* du conducteur de capacité C, chargé au potentiel V. Elle est récupérable par la décharge[1].

1. Voir J. Joubert, *Traité élémentaire d'électricité*.

CHAPITRE V

INFLUENCE ÉLECTROSTATIQUE.

841. **Influence sur les corps bons conducteurs.** — *Étude expérimentale.* — On montre habituellement l'électrisation par influence, dans le cas des corps bons conducteurs, à l'aide des expériences suivantes, dues à Æpinus.

On prend un cylindre de laiton A, isolé sur un pied de verre,

Fig. 749.

et portant à ses extrémités deux petits pendules électriques, à balles de sureau et fils de chanvre, et fixés à des tiges métalliques (fig. 749), qui sont conducteurs. Lorsqu'on le place à une certaine distance d'une source d'électricité *positive* M, on observe la série de phénomènes suivants :

1° Les deux pendules divergent immédiatement : donc il y a eu électrisation instantanée :

2° Si l'on présente au pendule le plus rapproché de la source un bâton de cire d'Espagne, électrisé négativement, on observe une répulsion : donc ce pendule est chargé d'électricité négative. En présentant à l'autre pendule un tube de verre électrisé positivement, il y a également répulsion : donc ce pendule est électrisé positivement. Par conséquent, *un corps électrisé par influence et isolé possède à la fois, sur ses extrémités opposées, les deux espèces d'électricités à l'état libre.*

Si l'on a disposé plusieurs pendules le long du cylindre, on constate que leur divergence décroît rapidement à partir des extrémités, et qu'elle devient nulle en un certain nombre de points, qui constituent la *ligne neutre.*

On peut également constater l'existence d'une ligne neutre en touchant avec un plan d'épreuve les diverses régions du cylindre. Elle n'est jamais au milieu du cylindre; sa position dépend de la charge électrique et de la distance du cylindre au corps induisant; mais elle est toujours plus rapprochée de l'extrémité voisine de l'inducteur.

3° Aussitôt que l'influence cesse, les deux électricités se recombinent, et le corps revient à l'état neutre. En effet, les pendules retombent dès qu'on éloigne A de l'*inducteur*, où dès qu'on ramène celui-ci à l'état neutre.

Cela prouve aussi que les charges électriques, positive et négative, aux deux extrémités du cylindre, étaient équivalentes.

4° Lorsque le conducteur est encore électrisé par influence, si on le touche *en un quelconque de ses points* avec une tige métallique ou avec le doigt, *l'électricité de même nom que celle de l'inducteur s'écoule dans le sol et l'électricité de nom contraire est retenue par l'inducteur.* Par exemple, dans le cylindre A, c'est l'électricité négative qui reste, soit qu'on touche l'extrémité positive, la négative, ou la partie médiane.

5° *Inductions successives.* — Un corps électrisé par influence agit à son tour sur les conducteurs voisins pour y séparer les deux électricités : c'est ce que montre la disposition des signes + et — sur un second cylindre B placé à la suite du cylindre A.

6° *Théorie.* — La théorie de Symmer permet de se rendre aisément compte de tous les détails de ce phénomène. On peut d'ailleurs les expliquer et les calculer rigoureusement, en considérant l'influence comme un cas particulier de la distribution de l'électricité sur un conducteur placé dans un champ électrique déterminé.

Remarques. — 1° *En suivant une ligne de force*, on voit que l'électricité néga-

tive apparaît sur la surface au point où la ligne aboutit, et que l'électricité positive apparaît au point d'où la ligne s'éloigne.

Il est évident, en outre, que les lignes de force rencontrent *normalement* la surface d'un conducteur électrisé en équilibre, puisqu'une telle surface est *équipotentielle*.

2° On a objecté à l'appareil d'Æpinus qu'il ne démontre pas l'électrisation de l'extrémité la plus rapprochée de la source, puisque la divergence du pendule correspondant pourrait s'expliquer par l'attraction directe de celle-ci.

Mais la méthode du plan d'épreuve, qui est indépendante des indications des pendules, permet de répondre à toutes les objections.

842. Quantité d'électricité induite : théorème de Faraday. — La quantité d'électricité induite dépend à la fois de la charge de l'inducteur et de l'étendue de surface de l'induit qui est en regard de l'inducteur, c'est-à-dire de l'utilisation des lignes de force du champ électrique inducteur. Elle est déterminée, dans le cas particulier où l'inducteur enveloppe complètement l'induit, par le théorème suivant, dû à Faraday :

Un corps conducteur électrisé, entouré complètement par un autre conducteur, induit sur la face en regard une quantité d'électricité contraire, qui est égale à sa propre charge.

Vérification : Expérience du cylindre de Faraday. — 1° On prend un cylindre métallique creux C (fig. 750, I) posé sur une plaque de paraffine P et communiquant, par le fil *f'*, avec un électroscope éloigné E. On fait ensuite descendre lentement dans la cavité une boule électrisée positivement, par exemple, et suspendue à une tige isolante. Le double pendule diverge aussitôt, en indiquant une charge positive, conformément aux lois de l'induction. La grandeur de la divergence indique à chaque instant la grandeur de la charge induite. On constate que l'écart augmente d'abord à mesure que la boule descend. Dès que le couvercle *c* ferme le cylindre, l'inducteur étant complètement enveloppé, la divergence reste constante : ce qui prouve que la charge induite a atteint son maximum. La divergence n'augmente pas davantage lorsque la boule arrive au contact des parois; or à cet endroit les électricités contraires de la boule et de la paroi interne se recombinent. Si la charge inductrice était supérieure à la charge négative induite, l'excès irait en partie se réunir à la charge positive de l'électroscope, et en augmenterait la divergence. Si, au contraire, cette charge était inférieure, c'est l'excès de E qui passerait en partie sur la boule : alors la divergence diminuerait et l'on retirerait la boule encore électrisée. Or rien de tout cela n'a lieu : donc la charge induite était égale à la charge inductrice à partir

de la position pour laquelle la cavité cylindrique s'est trouvée fermée.

2° Si on répète la même expérience après avoir introduit dans C un second cylindre C′ (fig. 750, II) isolé du premier par un disque

Fig. 750. (Cours de M. G. Lippmann.)

de paraffine P et par un support I à pieds de verre, destiné à recevoir le corps inducteur, on constate que l'électroscope n'est pas actionné, pourvu qu'on ait soin de mettre C′ en communication avec le sol *par l'intermédiaire* de la conduite d'eau T. Cela prouve *que, dans le cas où l'induit est au sol*, les charges intérieures

(inductrice et induite) sont équivalentes et distribuées de manière à ne produire à l'extérieur qu'un *champ nul*.

3° *Théorie.* — Si on introduit des conducteurs électrisés A à l'intérieur d'un conducteur creux B, une fois l'équilibre électrique établi, le champ est nul dans toute l'épaisseur de B (fig. 751). Le flux relatif à une surface quelconque S tracée dans l'épaisseur du conducteur est donc nécessairement nul, et puisqu'il a pour valeur $4\pi\Sigma m$, il faut que Σm soit nulle, ce qui exige qu'il y ait autant d'électricité attirée sur la surface intérieure qu'il y en a eu d'introduite ; de plus, les charges influençantes et influencées doivent être de signes contraires. La charge qui passe sur la surface extérieure est donc égale à la charge inductrice et de même signe.

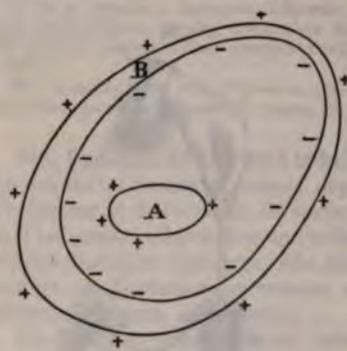


Fig. 751.

843. Influence d'une surface électrisée fermée sur un point intérieur. — La réciproque du théorème de Faraday n'est pas vraie : en effet, dans le cas où c'est l'inducteur qui enveloppe complètement l'induit, *il n'y a pas d'induction*, puisqu'une couche électrique quelconque, en équilibre sur un conducteur, produit un champ intérieur *nul*. On pourrait démontrer ce fait directement à l'aide de l'appareil ci-dessus (fig. 750).

Remarque. — Ce fait permet d'expliquer pourquoi, *dans le cas d'un conducteur induit qui enveloppe complètement l'inducteur, la charge interne de l'induit ne varie pas lorsqu'on le met en communication avec le sol.*

En effet, on ne fait disparaître ainsi sur l'induit que l'électricité de même signe que la charge de l'inducteur. Or, cette électricité formant une couche en équilibre à la surface externe de l'induit, elle n'exerce aucune action sur un point intérieur : sa disparition ne peut donc avoir aucun effet sur la charge induite de la face interne.

844. Conséquences du théorème de Faraday. — 1° *Addition des charges.* — On possède ainsi le moyen de faire la *somme algébrique* de charges électriques données. Il suffit de les introduire dans le cylindre C : la charge extérieure de celui-ci est égale à la somme algébrique des charges introduites, et la charge interne est mesurée par cette somme algébrique prise en signe contraire. En général, tout phénomène qui donnerait naissance à des quantités équivalentes des deux électricités, s'accomplissant à l'intérieur de la cavité, laisserait au zéro les feuilles *ff* de l'électroscope.

2° *Écran électrique.* — Lorsque l'induit C' a été mis en communication avec le sol, il ne reste dans le système que les charges égales et contraires qui sont en présence. Leurs actions sur un point extérieur au système sont égales et de signe contraire d'après la deuxième expérience (fig. 750), et par suite elles ont

une résultante nulle, puisque le conducteur C n'est pas influencé par le système.

Par conséquent, si l'on enveloppe un corps électrisé par un conducteur métallique communiquant avec le sol, on supprime l'influence de ce corps sur les points extérieurs au conducteur, sans avoir besoin de décharger celui-ci. On réalise ainsi un *champ électrique rigoureusement limité* à la paroi externe du conducteur.

On voit que cette enveloppe conductrice joue par rapport à l'électricité le même rôle qu'une surface opaque par rapport à la lumière : de là le nom d'*écran électrique* donné quelquefois à ce conducteur enveloppant. Elle protège également le conducteur enveloppé contre les actions électriques *extérieures* : aussi la plupart des appareils de mesure électrostatiques sont-ils entourés par des enveloppes métalliques.

845. Influence sur les corps mauvais conducteurs, pénétration dans leur masse. — On a vu que les corps bons conducteurs s'électrisent *instantanément* par influence ; il n'en est pas de même des corps mauvais conducteurs : seulement l'action est très lente et très faible. De plus, l'électrisation a encore lieu ; seulement l'isolant n'est pas électrisé à sa surface, mais sa masse paraît être pénétrée par l'électricité, jusqu'à une certaine profondeur.

Expérience de Faraday. — Faraday a démontré ce fait de la manière suivante : sur les deux faces opposées d'un bloc épais de blanc de baleine C (fig. 752) sont appliqués deux minces plateaux de laiton, communiquant, par

Fig. 752.

deux cordons, l'un avec une source d'électricité positive, l'autre avec le sol. Après un contact de dix minutes environ avec la source, on enlève les deux cordons et on constate que les plateaux sont électrisés, le premier positivement et le second négativement. Or, si on les ramène ensuite à l'état neutre en les touchant successivement avec le doigt, on observe qu'au bout de quelques instants le plateau placé du côté de la source est redevenu positif et l'autre négatif. Il faut en conclure que l'électricité de la source avait pénétré dans le blanc de baleine, tandis que dans la face opposée pénétrait l'électricité négative attirée par influence, et que ce sont ces électricités qui reparaissent sur les plateaux.

846. Communication de l'électricité à distance. — Décharge disruptive et Décharge conductive. — Dans l'expérience fondamentale de l'induction (fig. 749), les électricités contraires du conducteur et du cylindre tendent à se réunir, et elles ne restent

maintenues à la surface de ces deux corps que par la résistance de l'air. Si cette résistance diminue, ou si la tension électrique augmente, celle-ci l'emporte sur celle-là, et les deux fluides se recomposent au travers de l'air : cette recomposition est accompagnée d'un bruit sec et d'une étincelle plus ou moins vive. L'électricité négative du cylindre se trouvant ainsi neutralisée par l'électricité positive que lui a cédée la source, il ne reste plus sur le premier que de l'électricité positive; il la conserve d'ailleurs, quoique l'influence ait cessé.

Quant à la *distance explosive*, elle varie avec le potentiel, la forme des corps, leur pouvoir conducteur, et l'isolement des milieux interposés.

La décharge qui se produit avec étincelle et avec bruit se désigne sous le nom de *décharge disruptive*, pour la distinguer de la *décharge silencieuse* ou *conductive* qui s'opère, par exemple, entre un corps électrisé et le sol, lorsqu'ils sont reliés par un conducteur.

847. **Mouvements des corps électrisés.** — Les mouvements d'attraction et de répulsion qui se produisent entre les corps électrisés s'expliquent aisément par l'influence électrostatique. En effet, soit un corps fixe M (fig. 755) que nous supposerons électrisé positivement, et un corps mobile N, placé à une petite distance du premier; on peut considérer trois cas.

1° *Le corps mobile est conducteur et à l'état neutre.* — Le corps M, agissant par influence sur l'électricité neutre du corps N, attire l'électricité négative et repousse la positive, de sorte que la densité maximum des deux électricités a lieu respectivement aux points *a* et *b*. Or l'attraction entre les points *a* et *c* l'emporte sur la répulsion entre les points *b* et *c*, et le corps mobile, s'il est *suffisamment léger*, s'approche du corps fixe par l'effet d'une résultante égale à l'excès de la force attractive sur la force répulsive. Et si le fil de suspension est conducteur, l'attraction seule persistera.

2° *Le corps mobile est conducteur et électrisé.* — Si le corps mobile est chargé d'une électricité contraire à celle du corps M, il y a toujours attraction; s'il est chargé de la même électricité, il y a répulsion pour une certaine distance. Mais plus près il peut y avoir attraction. En effet, outre l'électricité libre que contient déjà le corps mobile, il contient aussi de l'électricité neutre, et, celle-ci étant décomposée par l'influence positive du corps M, l'hémisphère *b* reçoit une nouvelle quantité d'électricité positive, pendant que l'hémisphère *a* se charge d'électricité négative; il y a donc, comme dans le cas précédent, attraction et répulsion. La seconde force l'emporte d'abord sur la première, parce que la quantité d'électricité positive sur le corps N est plus grande que la quantité d'électricité négative; mais, l'intervalle *ac* diminuant, la force attractive croît plus vite que la force répulsive et peut finir par l'emporter sur celle-ci.

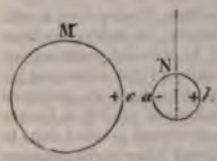


Fig. 755.

3° *Le corps mobile est isolant et électrisé.* — Le corps mobile est alors repoussé ou attiré, selon qu'il est chargé de la même électricité que le corps

fixe ou d'une électricité contraire. S'il est d'abord à l'état naturel, son fluide neutre peut être décomposé à la longue par l'influence du corps M, pourvu que ce dernier soit suffisamment électrisé, et alors il y a attraction.

848. **Théorie de l'influence électrostatique.** — En général, un conducteur *n'est pas isolé* : il se trouve dans un champ électrique, par lequel il est influencé. Dans ce cas son potentiel dépend à la fois de sa charge propre et des masses électriques disséminées dans le champ, et soit à la surface d'autres conducteurs électrisés, soit sur le sol ou les parois du laboratoire : il faut donc tenir compte de ces masses dans l'évaluation du potentiel. Soient donc $\left(\frac{q}{r} + \frac{q_1}{r_1} + \cdots\right)$ la somme des termes relatifs à la charge propre du conducteur et $\left(\frac{q'}{r'} + \frac{q'_1}{r'_1} + \cdots\right)$ la somme des termes relatifs aux masses électriques du champ ; on a, dans le cas général,

$$V = \Sigma\left(\frac{q}{r}\right) + \Sigma\left(\frac{q'}{r'}\right).$$

Supposons que toutes les masses q' soient réunies sur un conducteur unique B (fig. 754). Si B est chargé *positivement*, le potentiel en A sera plus grand que si A était isolé, et il sera d'autant plus grand que B est plus rapproché, car alors $\Sigma \frac{q'}{r'}$ est formé de termes positifs, d'autant plus grands que les distances r' sont plus petites. Si B est chargé *négativement*, le potentiel de A sera diminué par suite de la proximité de B, et d'autant plus que B est plus rapproché, car alors les termes $\frac{q'}{r'}$ sont tous négatifs et d'autant plus grands, en valeur absolue, que les distances r' sont plus petites.

Si B est *à l'état neutre*, il subit le *phénomène d'influence* (fig. 754) dès qu'il est suffisamment rapproché de A ; son fluide neutre est décomposé, le fluide négatif attiré dans la région voisine de A et le fluide positif repoussé en quantité égale dans la région opposée. Il en résulte : 1° que le potentiel, qui était d'abord nul en B, prend une certaine valeur positive ; 2° que le potentiel est diminué en A, car le fluide négatif de B agit en A à une distance moindre que le fluide positif, et par suite la somme $\Sigma\left(\frac{q'}{r'}\right)$ est une somme algébrique où les termes positifs sont plus grands que les termes négatifs.

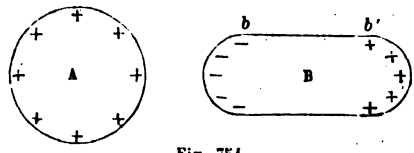


Fig. 754.

Si l'on mettait un point quelconque de B en communication avec la terre, son potentiel deviendrait égal à celui de la terre, c'est-à-dire *nul*, et le potentiel de A diminuerait un peu (à cause de la disparition des termes positifs qui dans la somme $\Sigma \frac{q'}{r'}$ correspondaient au fluide positif de l'extrémité b').

CHAPITRE VI.

CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET THÉORIE.

849. Condensation et Condensateurs. — On donne le nom général de *condensateurs* à des appareils qui servent à accumuler, sur des surfaces relativement petites, des quantités considérables d'électricité. Le phénomène de condensation n'est qu'un cas particulier de l'influence électrique. Il est facile de le mettre en évidence expérimentalement.

Un plateau métallique B (fig. 755), isolé et éloigné de tout conducteur, étant chargé au moyen d'une machine électrique, on constate un certain écart soit d'un pendule qui en est solidaire, soit des feuilles d'or d'un électroscope auquel on l'a relié métalliquement. Si l'on approche alors progressivement de B un autre conducteur isolé A, la machine étant au repos, on voit l'écart du pendule diminuer de plus en plus. Si l'on fait fonctionner de nouveau la machine, on rétablit dans l'électroscope l'écart primitif; et si l'on éloigne ensuite A après avoir supprimé la source d'électricité, on constate un écart beaucoup plus considérable. Donc, lorsqu'on charge le plateau B en présence de A, les autres conditions restant les mêmes, la charge prise est plus grande que lorsqu'on charge B en l'absence du plateau A.

On constate que l'effet de condensation est d'autant plus grand que les surfaces A et B en regard sont plus étendues ou plus voisines. La substitution d'une lame de verre ou de soufre à l'air augmente encore la condensation.

Ce dispositif expérimental, essentiellement composé de *deux corps conducteurs séparés par un corps isolant*, constitue un *condensateur*: Les divers condensateurs ne diffèrent entre eux que par la forme et les dimensions des conducteurs et par la nature de l'isolant.

850. Condensateur d'Æpinus. — Le précédent est le *condensateur à plateau* imaginé par Æpinus. Il est formé de deux plateaux de laiton A et B (fig. 755), et d'une lame de verre C qui les sépare. Les plateaux sont munis chacun d'un petit pendule

électrique à fil conducteur de chanvre et ils sont isolés sur deux colonnes de verre dont les pieds peuvent être déplacés et écartés l'un de l'autre le long d'une règle qui leur sert de support.

1° *Charge.* — Pour *charger* le condensateur, on amène les pla-

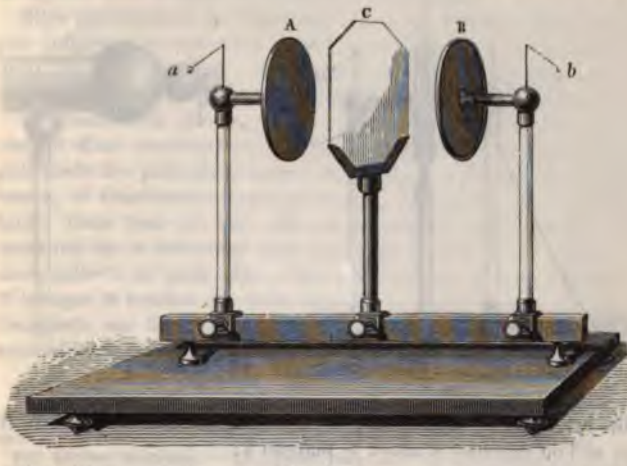


Fig. 755.

teaux en contact avec la lame de verre (fig. 756) ; puis, au moyen de cordons métalliques, on fait communiquer l'un d'eux, B par exemple (*collecteur*), avec une source d'électricité, et l'autre A (*condenseur*) avec le sol. Lorsque le pendule *b* du collecteur a atteint son écart *maximum*, le condensateur est dit chargé *à refus*; on rompt alors les communications avec la machine et avec le sol, en enlevant les deux cordons métalliques. Le collecteur est alors chargé *positivement*, comme la source, et le condenseur négativement ; mais le pendule de ce dernier *ne diverge pas*. Nous expliquerons plus loin ce fait : on l'exprime quelquefois en disant qu'il n'y a pas d'*électricité libre* sur le condenseur, ou qu'elle y est *dissimulée*.

2° *Décharge.* — On peut maintenant décharger le condensateur de deux manières, soit lentement, soit instantanément.

Décharge lente. — On touche avec le doigt d'abord le collecteur B, et l'on en tire une étincelle : on voit alors le pendule *b* retomber, tandis que le pendule *a*, qui était demeuré vertical, se *met à diverger (fig. 756)*. Si l'on touche maintenant le plateau A,

on en tire une deuxième étincelle : ce qui fait retomber *a* et diverger *b*. En continuant ces contacts alternatifs, on peut obtenir une série, plus ou moins longue, d'étincelles de plus en plus faibles. La décharge ne s'opère ainsi que très lentement, et, si

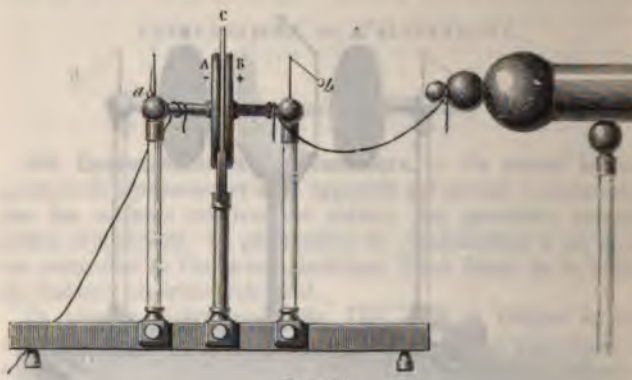


Fig. 756.

l'air est sec, elle peut exiger plusieurs heures. Elle ne réussirait pas si l'on touchait d'abord le plateau A.

Décharge instantanée. — On prend un *excitateur*, petit instrument forme de deux arcs de laiton, terminés par des boules de même métal et réunis par une charnière. (Quand les arcs sont munis de manches isolants de verre (fig. 757), c'est un *excitateur à manches de verre* ; s'il n'y pas de manches (fig. 760), c'est un *excitateur simple*. On applique l'une de ses boules sur un des plateaux du condensateur, et l'on approche progressivement l'autre boule du second plateau; il jaillit alors une forte étincelle, qui provient de la recomposition des électricités contraires accumulées sur les deux faces du condensateur : c'est la décharge *instantanée*.

Fig. 757.

Remarque. — Si, l'on touchait d'une main l'un des plateaux, et de l'autre main le second plateau, la recomposition s'opérerait par les bras et par le corps de l'opérateur, qui ressentirait alors une commotion plus ou moins violente.

Décharges secondaires. — Toutefois, après cette première dé-

charge, le condensateur n'est jamais complètement déchargé ; car on peut encore, après un court intervalle, en tirer de la même manière une deuxième, une troisième, et même davantage, mais qui sont de plus en plus faibles. Ces décharges successives se désignent sous le nom de *décharges secondaires*.

Elles proviennent de l'électricité qui s'est développée lentement par influence et a pénétré jusqu'à une faible profondeur dans les deux faces de l'isolant : elle réapparaît, lorsque les plateaux ont été déchargés une première fois, et elle les charge de nouveau.

3° *Limite de la charge.* — Nous démontrerons (860, 1°) que la charge d'un condensateur est *proportionnelle à la différence de potentiels des pôles de la source électrique et à la surface des plateaux, et inversement proportionnelle à l'épaisseur de la lame isolante.* Dans tous les cas, elle est limitée par deux causes : 1° le potentiel sur le collecteur finit par égaler celui de la source, et alors celle-ci ne peut plus céder d'électricité au condensateur ; 2° lorsque la tension des deux électricités contraires, accumulées, l'emporte sur la résistance de l'isolant qui les sépare, elles se recombinent à travers la lame, en la trouant le plus souvent.

4° *Condensateur à lame d'air.* — Cet appareil ne diffère du précédent que par la suppression du plateau de verre. La lame isolante est simplement constituée par la couche d'air interposée entre les deux plateaux métalliques.

851. **Carreau fulminant.** — Le *carreau fulminant*, dû à Franklin, est un con-

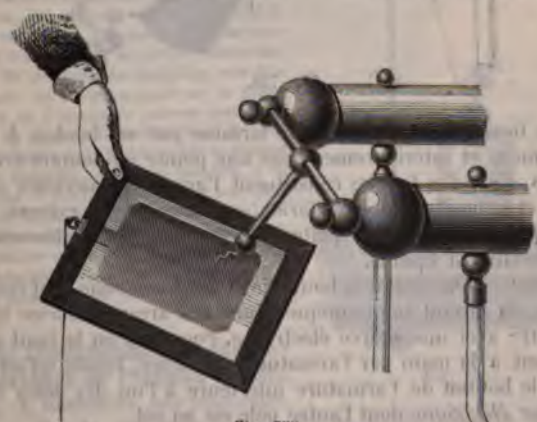


Fig. 758.

densateur plus simple que celui d'Æpinus (fig. 758). Il est formé d'un carreau de verre ordinaire, entouré d'un cadre de bois, sur les faces duquel sont collées,

en regard l'une de l'autre, deux feuilles d'étain qui laissent entre leurs bords et le cadre un intervalle de 6 cm environ. L'une d'elles est isolée par les bords du cadre, on peut mettre l'autre en communication avec le sol par l'intermédiaire d'un petit ruban d'étain, en contact avec un anneau auquel est suspendue une chaîne.

Pour charger le carreau fulminant, on présente à la source la feuille d'étain isolée, pendant que l'autre est *mise à la terre*. On peut le décharger, soit avec l'excitateur simple, soit, plus simplement, avec les deux mains; dans ce dernier cas, on reçoit une forte commotion.

852. **Bouteille de Leyde.** — La *bouteille de Leyde* est le plus ancien des *condensateurs*[1].

Elle se compose d'un flacon de verre mince, de grandeur variable. L'intérieur est rempli de feuilles d'or battu ou de clinquant ; sur la paroi extérieure est collée une feuille d'étain B, qui recouvre aussi le fond, mais qui laisse le verre à nu jusqu'à une assez grande distance du goulot (fig. 759). Par un bouchon de liège adapté au col passe, à frottement dur, une tige de cuivre recour-

Fig. 759.

bée en forme de crochet, qui se termine par un bouton A extérieurement et intérieurement par une pointe en contact avec les feuilles d'or. Ces feuilles constituent l'*armature intérieure* ou *interne*, et la feuille d'étain B l'*armature extérieure* ou *externe*. Elles correspondent aux deux plateaux, collecteur et condenseur, du condensateur d'Æpinus.

Charge. — On charge la bouteille de Leyde, comme tout condensateur, en faisant communiquer l'une des armatures avec le sol. et l'autre avec une source électrique. Pour cela on la tient généralement à la main par l'armature extérieure, tandis qu'on présente le bouton de l'armature intérieure à l'un des pôles d'une machine électrique dont l'autre pôle est au sol.

1. Elle est ainsi appelée du nom de la ville où elle fut inventée, en 1746 par Musschenbroek ou par son élève Cuneus. C'est Franklin qui en donna la théorie, en montrant qu'elle est un condensateur comme le carreau fulminant.

Décharge. — Elle peut être *lente* ou *instantanée*. Pour décharger la bouteille instantanément, on la tient à la main, et l'on met en communication les deux armatures à l'aide de l'excitateur simple. Il faut avoir soin de toucher *d'abord* l'armature qu'on tient à la main, sinon on reçoit la commotion (fig. 760). Pour la décharger lentement, on l'isole sur un gâteau de résine, et l'on touche alternativement, avec la main ou avec une tige de métal, l'armature intérieure, puis l'armature extérieure, et ainsi de suite : on tire ainsi, à chaque contact, une étincelle de plus en plus faible.

Fig. 760.

Expérience. — On réalise d'une manière curieuse la décharge lente par une vieille expérience classique (fig. 761). La tige de l'armature interne est droite et munie d'un timbre *d* ; près de la bouteille est fixée une autre tige métallique communiquant avec l'armature externe, qui porte un timbre *e* semblable au premier, et un pendule électrique formé d'une boule de cuivre suspendue à un fil de soie. La bouteille, une fois chargée, est mise en place sur la planchette *m*. L'armature interne contenant alors un excès d'électricité libre, le pendule est attiré et vient heurter le timbre de la bouteille ; repoussé aussitôt, il va choquer le timbre *e* et lui cède son électricité ; mais, revenu à l'état neutre, il est attiré de nouveau par le timbre *d*, et ainsi de suite. Ce va-et-vient peut durer plusieurs heures, si l'air est sec et la bouteille un peu grande.

Fig. 761.

853. Distribution de la charge : Expérience de Franklin — Franklin, a démontré par une expérience directe que dans la bouteille de Leyde, comme dans tous les condensateurs, ce ne sont pas seulement les deux armatures *qui sont électrisées*, mais surtout les faces de l'isolant qui les

sépare. Il s'est servi, pour cela, d'une bouteille de Leyde, dite *à armatures mobiles*, parce que ses différentes pièces peuvent se séparer. Elle est constituée par la réunion d'un vase conique de verre B (fig. 762), d'une armature extérieure de fer-blanc C, et d'une armature intérieure de même matière D (fig. 762, A). Après l'avoir électrisée comme la bouteille ordinaire, on l'isole sur un gâteau de résine; alors, avec la main, on enlève l'armature intérieure, ensuite le vase de verre, puis l'armature extérieure, et l'on dispose ces pièces les unes à côté des autres (fig. 762, B, C, D). Or les deux armatures ont été évidemment, par suite du contact avec la main de l'opérateur, ramenées à l'état neutre. Cependant, si l'on reconstitue la bouteille de Leyde, on peut en tirer une

Fig. 762.

nouvelle étincelle, presque aussi forte que si l'on n'avait pas déchargé les deux armatures.

Plusieurs *décharges secondaires* peuvent être produites successivement. L'explication que nous en avons donnée est confirmée par cette expérience.

854. **Jarres** et **Batteries électriques.** — On emploie, sous le nom de *jarre électrique*, une grande bouteille de Leyde (fig. 768) à large goulot; sur sa paroi interne est collée une feuille d'étain qui sert d'armature intérieure. La tige qui traverse le bouchon est droite et terminée, à la partie inférieure, par une chaîne métallique qui la met en communication avec la feuille d'étain; l'armature intérieure est constituée par une autre feuille d'étain collée sur le verre extérieurement.

Une *batterie électrique* est l'assemblage de plusieurs jarres placées dans une caisse de bois (fig. 765 et 764), qui communiquent ensemble, intérieurement, au moyen de tiges de métal, et extérieurement par une feuille d'étain qui revêt le fond de la caisse

et se trouve en contact avec les armatures externes des jarres. Cette feuille se prolonge latéralement jusqu'à la rencontre de deux poignées métalliques fixées sur les parois de la caisse. Une batterie constitue une sorte de bouteille de Leyde à très grande surface.

Remarque. — On construit également des batteries avec des condensateurs formés de lames de mica argenté, de carreaux de Franklin convenablement disposés; les feuilles d'étain peuvent être collées sur des feuilles de papier paraffiné ou de mica.

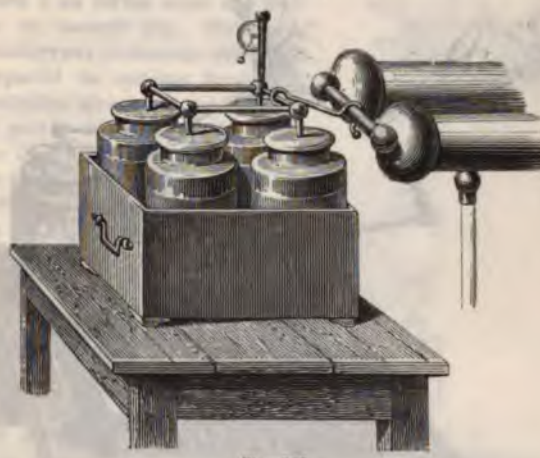


Fig. 763.

Ces condensateurs sont souvent rangés dans des boîtes ayant l'aspect extérieur de boîtes de résistance.

Charge. — On fait communiquer les armatures internes avec l'un des pôles d'une machine électrique, dont l'autre pôle est mis à la terre; les armatures externes sont également mises à la terre, par l'intermédiaire d'une chaîne fixée à l'une des poignées de la caisse. Un électroscope à cadran, placé sur l'une des jarres, indique la marche de l'opération : l'aiguille ne diverge que lentement et d'un petit nombre de degrés, parce que l'écart n'a lieu qu'en vertu de la différence de potentiels qui s'établit entre les armatures. Le nombre des jarres est, en général, de quatre, six ou neuf. Plus elles sont grandes et nombreuses, plus il faut de temps pour charger la batterie, mais aussi plus ses effets sont puissants.

Décharge. — On fait communiquer entre elles les deux armatures

au moyen d'un excitateur, en ayant soin de toucher d'abord l'armature externe. On doit faire usage de l'excitateur à manches de verre, et prendre toutes les précautions nécessaires pour éviter la commotion qui pourrait être très dangereuse, car avec une forte batterie la décharge peut entraîner de graves accidents.

Remarques — 1° Il est bon de placer les appareils que l'on peut avoir à toucher dans la partie du circuit de la bouteille en

Fig. 761.

communication avec le sol. En opérant ainsi, on n'a pas à redouter les décharges.

2° *Emploi de l'excitateur universel.* — On appelle ainsi une petite caisse de bois portant deux colonnes de verre (fig. 761), sur lesquelles sont fixées à charnière des tiges de cuivre isolantes, comprenant entre elles un petit plateau monté sur pied de bois; c'est là qu'on place l'objet ou l'animal sur lequel on veut expérimenter. Les deux tiges de cuivre étant dirigées vers cet objet, on fait communiquer l'une d'elles avec l'armature extérieure de la

batterie, et l'autre avec l'une des boules de l'excitateur à manches de verre. Si l'on approche alors la seconde boule vers l'armature intérieure, une étincelle part entre cette boule et l'armature, et une autre entre les branches de l'excitateur universel : c'est cette dernière qui traverse l'objet placé sur le plateau.

855. **Batterie en cascade.** — On peut aussi associer des condensateurs de manière que l'armature intérieure de l'un d'eux communique avec l'armature extérieure du suivant : on forme ainsi une *batterie en cascade* (fig. 765). Nous démontrerons ci-dessous (860) que la capacité du système formé par n bouteilles identiques est alors la $n^{ième}$ partie de la capacité d'une seule bouteille et sur chaque bouteille la différence de potentiel est la $n^{ième}$ partie de celle des armatures extrêmes.

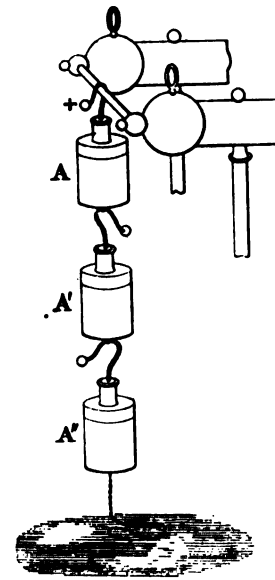


Fig. 765.

856. **Électroscope condensateur de Volta.** — L'*électroscope condensateur*, imaginé par Volta, n'est autre chose que l'électroscope à feuilles d'or (885), rendu beaucoup plus sensible par l'adjonction d'un condensateur. La tige de cuivre qui porte les petites feuilles d'or se termine, à la partie supérieure, non par une boule de laiton, mais par un disque de même métal, sur lequel peut s'appliquer un second disque semblable, muni d'un manche de verre. Les deux disques sont recouverts d'une couche de vernis à la gomme laque, qui les isole : l'ensemble des plateaux métalliques et du vernis isolant constitue un *condensateur*.

Fonctionnement. — Cet appareil permet, non pas de *mesurer*, mais de manifester l'existence de certaines sources d'électricité de faible potentiel, qui n'agiraient pas sur l'électroscope à feuilles d'or. On fait communiquer l'un des pôles de la source avec le plateau inférieur qui sert de *collecteur*, et l'on met le plateau *supérieur à la terre*, en le touchant avec le doigt mouillé (*fig. 766*) : les deux électricités s'accumulent alors sur les

plateaux. L'appareil étant ainsi chargé, on retire le doigt d'abord, puis la source d'électricité, sans qu'on observe encore aucune divergence; mais si l'on enlève le plateau supérieur (fig. 767), l'électricité du second plateau, laquelle est de même espèce que celle du pôle utilisé de la source, se distribue alors sur la tige et sur les feuilles d'or, et celles-ci divergent nettement.

On augmente la sensibilité en adaptant au pied de l'appareil

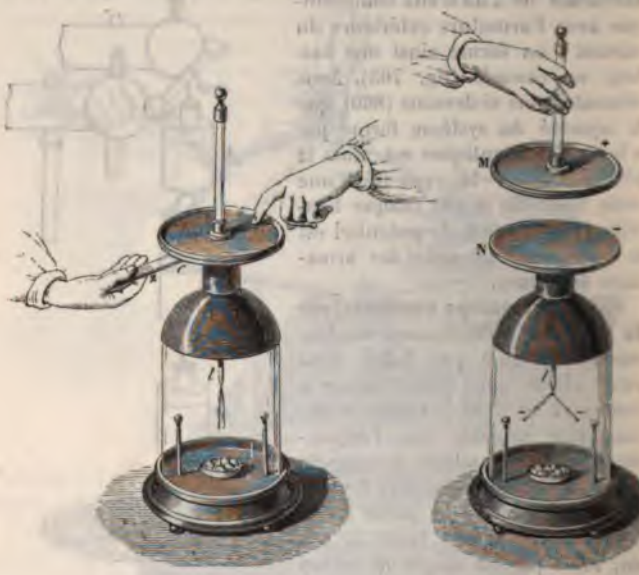


Fig. 766. Fig. 767.

deux tiges de cuivre terminées par des boules de même métal qui, en s'électrisant par l'influence des feuilles d'or, réagissent sur elles et en augmentent l'écart. On améliore beaucoup l'appareil en y adaptant encore le bouchon-support de paraffine de M. Boudréaux (818).

857. **Bouteille de Lane** ou **Électromètre à décharges.** — On appelle *bouteille de Lane* une bouteille de Leyde disposée de manière à mesurer des charges : elle permet de comparer les débits de machines électriques puissantes, comme celle de Holtz, de Wimshurst, etc.

L'armature interne est mise en communication par un cordon

métallique avec la source électrique (fig. 768). La bouteille repose sur un plateau de laiton par son armature externe; celle-ci communique, par une lame et une tige *a* de laiton, avec un bouton *n*, qu'on peut rapprocher plus ou moins de l'armature interne de la bouteille.

Lorsque la différence des potentiels sur les deux boutons *m* et *n* est devenue assez grande pour vaincre la résistance de l'air, des étincelles successives éclatent d'un bouton à l'autre et déchargent

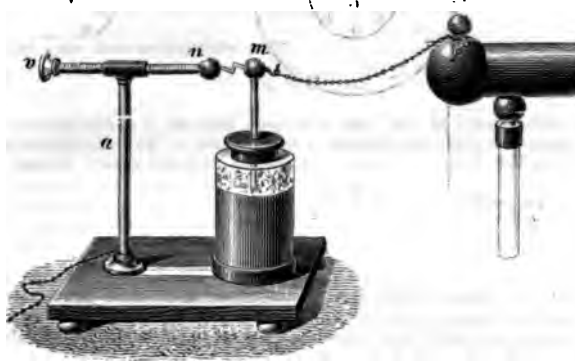


Fig. 768.

la bouteille : pour une même distance des deux boutons, le nombre des étincelles dans l'unité de temps est proportionnel à la quantité d'électricité fournie par la source. Cette bouteille fait l'office d'une espèce de jauge pour mesurer l'électricité qui s'écoule de la source : l'unité de mesure est alors la quantité d'électricité qui se dégage à chaque étincelle; elle varie avec la *capacité électrique* de la bouteille et avec sa *distance explosive* (écartement des boutons).

858. **Théorie de la condensation électrique. — Cas du condensateur sphérique.** — La condensation électrique n'est pas autre chose qu'un phénomène d'influence qui a lieu lorsque l'inducteur A est maintenu à un potentiel constant, par une communication *lointaine* avec une source électrique de potentiel constant V, et que l'induit B est maintenu à un potentiel nul par une communication permanente avec le sol.

Le cas le plus simple est celui du *condensateur sphérique*, qui est théoriquement le plus parfait des condensateurs.

1° *Explication du phénomène.* — Soit A l'inducteur sphérique de rayon r, et soit B *une autre sphère métallique* plus grande, de rayon R, concentrique à *la première, isolée d'elle et communiquant* avec le sol. Elle prend, par induc-

tion une charge négative — Q, égale, en valeur absolue, à la charge positive + Q de l'inducteur, et elle est maintenue au potentiel zéro (fig. 769).

Or on peut calculer directement le potentiel de l'armature interne, en fonction de sa charge. La couche électrique étant en équilibre sur le conducteur, le

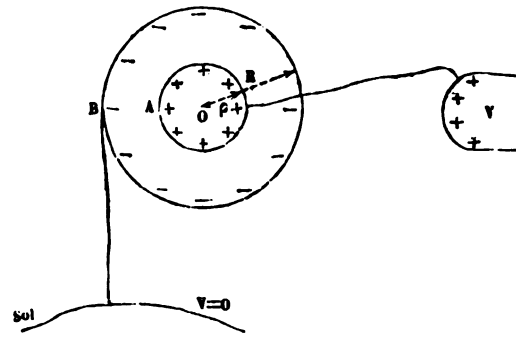


Fig. 769.

potentiel est le même en tout point du conducteur : on n'a donc qu'à le calculer pour son centre. On a, en tenant compte à la fois des charges distribuées sur la sphère A (qui sont toutes à la distance ρ du point O) et des charges distribuées sur B (qui sont toutes à la distance R),

$$V = \Sigma \frac{q}{\rho} - \Sigma \frac{q'}{R}.$$

Or

$$\Sigma \frac{q}{\rho} = \frac{\Sigma q}{\rho} = \frac{Q}{\rho} \qquad \text{et} \qquad \Sigma \frac{q'}{R} = \frac{\Sigma q'}{R} = \frac{Q}{R}.$$

Le potentiel au centre, et par conséquent sur l'armature elle-même, est donc

$$Q\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R}\right).$$

En exprimant qu'il est égal à celui de la source, on a l'équation

$$[1] \qquad V = Q\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R}\right).$$

Supposons maintenant que la sphère A, au lieu d'être l'armature interne d'un condensateur, soit complètement *isolée* dans l'espace. Si on la met en communication avec la même source, elle se mettra nécessairement au même potentiel V, mais elle prendra une charge Q_1 inférieure à Q. En effet, si l'on calcule maintenant le potentiel au centre, on trouve $\frac{Q_1}{\rho}$, et l'on a l'équation

$$[2] \qquad V = Q_1 \times \frac{1}{\rho}.$$

Or, en comparant les deuxièmes membres des deux équations, on voit qu'ils sont formés chacun de deux facteurs dont les produits sont égaux.

Le facteur $\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R}\right)$ étant évidemment *plus petit* que le facteur $\frac{1}{\rho}$, il en résulte *nécessairement* que l'autre facteur Q est *plus grand* que le facteur Q_1. Donc *la charge qu'il faut donner à un conducteur pour l'élever à un potentiel déterminé est plus grande lorsqu'il fait partie d'un condensateur que lorsqu'il est isolé.* C'est bien en cela que consiste la condensation.

2° *Autre interprétation du phénomène.* — D'après la définition de la capacité électrique, si l'on a dans le premier cas

$$[1] \qquad Q = CV,$$

on doit avoir dans le deuxième cas

$$[2] \qquad Q_1 = C_1 V,$$

C_1 étant différent de C. On peut donc dire aussi que *la condensation résulte d'une modification qui se produit dans la capacité électrique des conducteurs : la capacité d'un conducteur devient plus grande lorsqu'il fait partie d'un condensateur que lorsqu'il est isolé.*

3° *Calcul de la capacité du condensateur sphérique.* — Le système (AB) constitue un condensateur sphérique absolu, c'est-à-dire dont on peut calculer la capacité.

La formule
$$Q = V \cdot \frac{1}{\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R}}$$
donne en effet
$$C = \frac{1}{\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R}} = \frac{\rho R}{R - \rho}.$$

On voit qu'il y a théoriquement avantage à rapprocher autant que possible les deux sphères.

Pouvoir condensant. — Il est naturel de caractériser un condensateur par le quotient $\frac{Q}{Q_1}$ des charges qu'il faut donner à l'armature interne, par exemple, pour l'élever au même potentiel, soit quand elle fait partie du condensateur, soit quand elle est isolée. Ce coefficient est appelé *pouvoir condensant.*

Si l'on se reporte aux équations [1] et [2] ci-dessus, on a, en les divisant membre à membre,
$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{CV}{C_1 V} = \frac{C}{C_1}.$$

Le *pouvoir condensant* est donc encore égal au rapport de la capacité C que possède le collecteur dans le condensateur complet, à la capacité C_1 du collecteur isolé.

5° *Condensateurs plans. — Cas particuliers.* — Supposons que la distance $R - \rho$ des deux armatures reste constante et égale à d alors que les rayons R et ρ grandissent tous deux indéfiniment. La capacité par unité de surface de la sphère de rayon ρ a pour valeur

$$C' = \frac{C}{4\pi\rho^2} = \frac{R\rho}{(R-\rho)\,4\pi\rho^2} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{R}{(R-\rho)\rho} \qquad \text{ou} \qquad \frac{1}{4\pi d} \cdot \frac{R}{\rho}.$$

Lorsque R et ρ augmentent indéfiniment, leur rapport devient égal à 1 : alors $C' = \frac{1}{4\pi d}$; mais d'autre part les deux sphères sont alors deux plans : donc $\frac{S}{4\pi d}$ est la capacité relative à une surface S d'un condensateur plan à lame d'air dont les armatures sont à une distance égale à d.

859. **Pouvoir inducteur spécifique. — Expériences de Faraday.** — Faraday a trouvé que la capacité électrique d'un condensateur ne dépend pas seulement de la distance des armatures, mais qu'elle varie aussi avec la nature du corps isolant interposé. C'est cet isolant qu'il appelait le *diélectrique*.

Il a défini *pouvoir inducteur spécifique* d'un diélectrique le rapport qui existe entre la capacité d'un condensateur dont les armatures seraient séparées par une lame de cette substance et la capacité qu'il aurait si l'on remplaçait cette dernière par une couche d'air de même épaisseur.

Pour avoir le *pouvoir condensant réel*, il faut multiplier le *pouvoir condensant géométrique* par le nombre qui représente le *pouvoir inducteur spécifique* de la substance interposée.

En effet, en appelant P le pouvoir *condensant réel*, C_1 la capacité de l'armature interne isolée, C la capacité de l'armature interne faisant partie du condensateur à lame d'air, et C' la capacité de l'armature interne faisant partie du condensateur à lame diélectrique, on a, identiquement,

$$P = \frac{C'}{C_1} = \frac{C}{C_1} \times \frac{C'}{C}.$$

Or $\frac{C}{C_1}$ est le pouvoir condensant qui résulte de la figure géométrique de l'appareil (sans tenir compte du diélectrique), et $\frac{C'}{C}$ est précisément le pouvoir inducteur spécifique, tel qu'il a été défini plus haut.

Voici quelques-uns des nombres trouvés par Faraday :

Résine.	1,77	Gomme laque.	2,00
Verre.	1,80	Gutta-percha ordinaire. . .	3,80

Quant aux gaz, ils ont tous, d'après lui, sensiblement le même pouvoir inducteur, et qui n'est modifié ni par la température ni par la pression du gaz.

860. **Condensateurs ordinaires.** — 1° *Bouteille de Leyde.* — La quantité d'électricité ne peut pas être la même sur les deux armatures, puisque l'armature interne n'est pas *complètement enveloppée* par l'armature externe. L'enveloppe est complétée par l'espace environnant. Il en résulte qu'une petite quantité d'électricité paraît libre pour l'observateur qui se trouve placé entre le bouton et les corps avoisinants. C'est cette électricité libre qui fait diverger le pendule du collecteur dans le condensateur d'Épinus.

A la capacité due aux deux armatures cylindriques il faudrait donc ajouter celle du bouton extérieur ; mais sa valeur est ordinairement négligeable. Une bouteille de Leyde dont l'armature interne aurait une surface A, aurait pour capacité

$$C = K\frac{A}{4\pi d},$$

si l'espace annulaire d'épaisseur d est rempli par un milieu de pouvoir inducteur K, d étant très petit par rapport au rayon de l'armature interne. On conçoit, en effet, que, dans de telles conditions, chacun des éléments du condensateur cylindrique peut être considéré comme appartenant à un condensateur plan.

2° *Batteries électriques.* — La capacité d'une batterie ordinaire (854) est évidemment égale à la somme des capacités des jarres.

On a donc

$$C = K\frac{A}{4\pi d} + K'\frac{A'}{4\pi d'} + K''\left(\frac{A''}{4\pi d''}\right) + \ldots = \Sigma K\frac{A}{4\pi d},$$

en appelant A, A' A'',... les surfaces des armatures internes et d, d', d''... les distances à l'armature externe. Ordinairement les jarres sont formées du même verre, de même épaisseur et de même surface. On a donc

$$A = A' = A'' = \ldots, \qquad \text{et} \qquad C = K\frac{nA}{4\pi d},$$

n étant le nombre des jarres.

3° *Batterie en cascade.* — Des condensateurs sont réunis *en cascade*, lorsqu'on ne peut se rendre d'un pôle à l'autre du système sans traverser le diélectrique de tous les condensateurs A, A', A'' (855).

Calculons la *capacité du système.* Soient V et V' les potentiels obligatoires des armatures extrêmes, V'', V''', ..., les potentiels intermédiaires.

Si l'armature interne de A prend la charge + M, l'armature externe prendra par influence la charge M et le potentiel V'', l'armature suivante en communication avec la précédente prendra également le potentiel V'' et la charge + M ....

Si C, C', C'', ..., sont les capacités de chacun des condensateurs considéré seul, on a

$$M = C(V - V''), \qquad M = C'(V'' - V'''), \qquad M = C''(V''' - V''''), \ldots,$$

d'où

$$\frac{M}{C} = V - V'', \qquad \frac{M}{C'} = V'' - V''', \qquad \frac{M}{C''} = V''' - V'''', \ldots$$

d'où par addition

$$M\left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C'} + \frac{1}{C''} + \ldots\right) = V - V';$$

donc chaque armature prend la même charge M que celle d'un condensateur unique dont les armatures seraient portées aux potentiels V et V' et dont la capacité x serait

$$x = \frac{1}{\frac{1}{C} + \frac{1}{C'} + \frac{1}{C''} + \ldots}.$$

Si les condensateurs sont identiques par la forme et le diélectrique, on a $x = \frac{C}{n}$; d'où il suit que la capacité du système n'est que la $n^{ième}$ partie de celle d'un seul des condensateurs associés.

On remarquera que la différence de potentiel V — V' se partage alors en n parties égales, de sorte que le diélectrique de chaque élément n'a à supporter que la tension $\frac{V - V'}{n}$.

C'est là l'avantage de ce mode d'association.

4° *Shunt de différence de potentiel.* — Si on associe en cascade deux condensateurs de capacités respectives C et pC, la différence de potentiel V — V' de la source se trouve partagée en deux différences

$$V - V'' \qquad \text{et} \qquad V'' - V'$$

telles que

$$C(V - V'') = pC(V'' - V') \quad \text{d'où} \quad V - V'' = p(V'' - V')$$

et par suite

$$\frac{V - V''}{p} = V'' - V'.$$

La différence de potentiel entre les armatures de la grande capacité se trouve être ainsi la $n^{ième}$ partie de celle qui s'établit entre les armatures de la petite capacité. Si la première capacité est celle d'un électromètre sensible par exemple, on aura par là un moyen de fractionner la force électro-motrice à évaluer, comme on le fait pour les intensités de courant.

CHAPITRE VII

MACHINES ÉLECTRIQUES.

861. **Définitions et classification.** — On appelle *machines électriques* des sources d'électricité à haut potentiel, qui résultent soit du frottement réciproque d'organes mauvais conducteurs, soit de l'influence électrostatique d'organes mauvais conducteurs *mobiles* qui se déplacent devant des organes bons conducteurs *fixes*.

Les sources de la première catégorie, très peu employées aujourd'hui, sont appelées *machines à frottement*. La plus connue est la machine de Ramsden, disposée pour fournir plus spécialement de l'électricité positive. Les anciennes machines de Van Marum et de Nairne appartiennent à la même famille : la première permet de recueillir, à volonté, du fluide positif ou du fluide négatif; la deuxième donne simultanément les deux électricités. On peut y rattacher la curieuse machine d'Armstrong, qui donne de l'électricité à un potentiel élevé, par le frottement de gouttelettes liquides sur des parois solides de tuyaux en buis. Nous ne décrirons que la machine de Ramsden, qui est classique ; les autres ne sont plus employées et n'ont qu'un intérêt historique.

Les machines électriques de la deuxième catégorie sont dites *machines à influence*. Elles sont un perfectionnement des précédentes et les ont complètement remplacées dans la pratique. Nous décrirons successivement l'*électrophore*, qu'on peut rattacher à cette famille, et les machines de Carré, de Holtz et de Wimshurst.

862. **Machine électrique de Ramsden.** — 1° Historique. — La première machine électrique qui ait été employée est une machine à frottement, due à Otto de

Guericke. Elle consistait en une sphère de soufre fixée à un axe qu'on tournait d'une main, tandis que l'autre main appuyait sur la sphère et servait de frottoir. Bientôt on substitua à la boule de soufre un cylindre de résine et, plus tard, un cylindre de verre; mais il n'y avait pas d'autre frottoir que la main.

Vers 1740, Winkler employa un coussin de soie rembourré de crin. A la même époque, Bose recueillit sur un disque de fer-blanc suspendu à deux cordons de soie l'électricité dégagée par le frottement. Enfin, en 1766, Ramsden, de Londres, substitua au cylindre de verre un plateau circulaire de verre, frotté par quatre coussins. Dès lors la machine électrique eut la forme qu'on lui donne encore aujourd'hui.

2° *Description.* — Entre deux montants de bois (fig. 770) est un

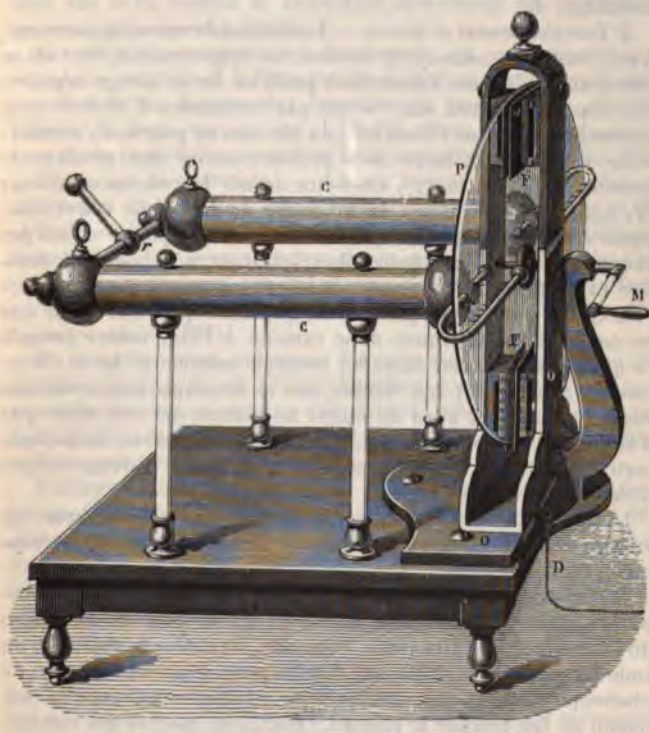


Fig. 770.

plateau circulaire de verre P, fixé par son centre à un axe qu'on *fait tourner à l'aide* d'une manivelle. Ce plateau est frotté, sui-

vant son diamètre vertical, entre quatre *frottoirs* ou *coussins* F, de cuir ou de soie. Suivant son diamètre horizontal, il passe entre deux tubes de laiton recourbés en fer à cheval, qu'on appelle *peignes* ou *mâchoires*, parce qu'ils sont armés de dents, placées des deux côtés, en regard du plateau. Ces peignes sont fixés à des tubes plus gros C, qu'on nomme les *conducteurs*, isolés sur quatre pieds de verre, et ils sont reliés entre eux par un tube *r* d'un plus petit diamètre. Enfin, des bandes d'étain O, collées des deux côtés des montants de bois qui portent les coussins, font communiquer ceux-ci avec le sol par l'intermédiaire d'une chaîne métallique D.

3° *Fonctionnement et théorie.* — Le plateau de verre, en tournant, frotte contre les coussins et les électrise négativement, tout en se chargeant lui-même d'électricité positive. Or la charge négative des coussins se perd dans le sol par les bandes d'étain O et la chaîne D, tandis que l'électricité du plateau, ne pouvant s'écouler, reste sur ses deux faces sans produire aucun effet pendant le premier quart de tour, c'est-à-dire depuis le coussin supérieur *a*F, par exemple, jusqu'à la mâchoire de droite. Là l'électricité positive du verre, agissant par influence sur le peigne et sur les conducteurs, en décompose l'électricité neutre, repousse la positive et soutire par les pointes la négative, qui vient se réunir à l'électricité positive du plateau. Le quadrant qui vient d'agir sur les conducteurs se trouve donc ramené à l'état neutre jusqu'à ce qu'il vienne passer entre les coussins inférieurs. Là il s'électrise de nouveau, et agit ensuite sur le deuxième peigne comme sur le premier, et ainsi de suite. Le plateau ne cède donc pas d'électricité aux conducteurs ; il ne fait qu'en *soutirer*, en quelque sorte, l'électricité négative, et c'est ainsi qu'ils restent chargés d'électricité positive.

La machine une fois chargée, si l'on en approche la main, on en tire des étincelles plus ou moins fortes, et aussi longtemps qu'on tourne le plateau.

Inversion de la charge. — La machine de Ramsden, ainsi disposée, donne de l'électricité positive; mais on peut en tirer aussi de l'électricité négative (806). Pour cela, on enlève la chaîne D, on isole les pieds de la table sur des supports épais de verre ou de résine, puis on fait communiquer les conducteurs C avec le sol. Quand on fait tourner le plateau, l'électricité positive des conducteurs se perd dans le sol, tandis que l'électricité négative des coussins se répand dans les montants en bois. En effet, si l'on approche la main soit d'une boule métallique fixée au sommet des montants, soit des bandes d'étain O, on en tire des étincelles.

4° *Constantes de la machine : débit* et *différence de potentiels.* — La machine de Ramsden et toutes les machines électrostatiques sont caractérisées par deux qualités, susceptibles de mesure : leur *débit* et leur *potentiel.* Ce sont les *constantes* de la machine.

Débit. — On appelle *débit* la quantité d'électricité que la machine dégage ou *débite* dans un temps donné (une seconde, par exemple), soit qu'on mette les coussins en communication avec le sol et les cylindres avec un conducteur qu'il s'agit de charger, soit qu'on réunisse les coussins et les cylindres à l'aide d'un fil, par lequel on opère la recombinaison des fluides. Dans ce dernier cas le fil devient le siège d'un mouvement des électricités qu'on appelle *courant électrique.*

Le débit d'une machine à frottement est *proportionnel* à la vitesse de rotation et à l'étendue de la surface frottée, mais *indépendant* de la largeur des coussins et, jusqu'à une certaine limite, de leur pression sur le verre. Nous avons indiqué un moyen de l'apprécier au moyen de la bouteille de Lane (fig. 768).

Différence de potentiels. — La deuxième constante, c'est la différence de potentiel qui s'établit entre les frottoirs et les cylindres conducteurs, ou bien entre ceux-ci et le sol, lorsque les frottoirs sont mis en communication avec la terre : elle s'apprécie empiriquement *par la longueur de l'étincelle* que peut fournir la machine en se déchargeant ou se mesure à l'aide d'un *électromètre absolu* (888).

Ce caractère n'est nullement lié au précédent. Tandis qu'une machine électrostatique à faible débit peut fournir de très longues étincelles, certaines sources d'électricité, telles que les piles voltaïques, dont le débit est considérable, ne fournissent pas d'étincelles appréciables.

D'ailleurs l'intensité des effets calorifiques et lumineux que l'étincelle produit ne dépend pas seulement de sa longueur. Des étincelles très longues, qui seraient grêles, auraient peu d'éclat et feraient peu de bruit : elles produiraient des effets médiocres. A longueur égale, les étincelles ont des effets d'autant plus intenses que la quantité d'électricité qui passe dans l'étincelle est plus considérable.

5° *Puissance de la machine.* — Si la machine est capable de charger n fois par seconde une bouteille de Lane de capacité C, la différence de potentiels entre les pôles de la machine étant égale à V, elle produit par seconde un travail $W = n \cdot \frac{CV^2}{2}$ (859) : la *puissance* de la machine est alors, par définition, *égale à* $\frac{nCV^2}{2}$.

6° *Limite de charge.* — Même lorsqu'on se met dans les conditions les plus favorables, le potentiel du conducteur de la machine a une limite qui ne peut être dépassée, quelles que soient la vitesse de rotation du plateau et la durée de l'opération. Cette limite est plus ou moins élevée pour la même machine, à cause de la déperdition plus ou moins abondante qui se produit par l'air, par les supports et par la recomposition d'une portion des deux électricités des conducteurs et des coussins.

On a déjà parlé des deux premières causes de déperdition; quant à la troisième, elle est une conséquence même du jeu de la machine. En effet, le potentiel sur les conducteurs croissant avec la vitesse de rotation, il vient un moment où des étincelles éclatent entre les mâchoires et les coussins. On a atteint alors une *limite de charge* analogue à la *limite pratique du vide* dans la machine pneumatique. Pour atténuer l'effet de ces décharges spontanées, on isole et on éloigne les coussins qui constituent l'un des pôles de la machine aussi loin que possible du conducteur qui constitue l'autre pôle. Afin de faire porter tout le potentiel sur le conducteur, on a soin de coller le long des montants de bois de la machine les feuilles d'étain O (fig. 770), qui descendent des coussins jusqu'à la chaîne D. Enfin, celle-ci doit plonger dans l'eau d'un puits, ou communiquer avec le pied d'un arbre, ou, s'il est possible, avec l'une des conduites de gaz ou d'eau du laboratoire où l'on se sert de la machine.

863. **Principe des machines à influence. — Historique.** — Dans les machines du genre Ramsden, l'électricité est due au frottement qui est obtenu lui-même par le travail d'un moteur. Il se produit donc ici une sorte de transformation du travail en électricité. Cette transformation est effectuée d'une manière plus apparente par les machines électriques sans frottement, dans lesquelles l'influence électrostatique d'une charge fixe d'électricité sert à électriser pour ainsi dire indéfiniment un plateau mobile. Les premières machines de ce genre ont été construites, en 1865, par Holtz et, à peu près à la même époque, par Tœpler; mais, dès la fin du siècle dernier, Volta avait inventé un appareil fondé sur le même principe : c'est l'*électrophore*, qu'on peut considérer comme la plus simple des machines électriques fonctionnant *par influence*.

864. **Électrophore (de Volta).** — L'appareil se compose simplement d'un gâteau de résine B (fig. 772), coulé dans un moule de bois, ou mieux dans un moule métallique, et d'un disque de bois A, recouvert d'une feuille d'étain et muni d'un manche isolant de verre. Il est avantageux que la résine soit mélan-

gée de poix, et il faut que la surface du gâteau soit lisse.

On commence par sécher la résine et le disque en les chauffant doucement, puis on bat le gâteau avec une peau de chat, ce qui l'électrise négativement. Si l'on pose alors le disque de bois recouvert d'étain sur la résine (fig. 771), celle-ci, qui est très mauvaise conductrice, conserve son électricité négative, et, par son influence sur le disque, attire l'électricité positive vers la face en contact avec elle, tandis qu'elle repousse sur l'autre face l'électricité négative. En touchant alors la feuille d'étain avec le doigt, c'est l'électricité négative qu'on soustrait, et le disque de

Fig. 771. Fig. 772.

bois reste électrisé positivement. En effet, si on l'enlève d'une main par le manche de verre, et si on lui présente l'autre main (fig. 772), on en tire une vive étincelle, due à la recomposition de l'électricité positive du disque avec l'électricité négative de la main. Cette étincelle suffit pour faire détoner dans l'eudiomètre des mélanges gazeux et opérer des synthèses chimiques.

Remarques. — 1° En réalité, les phénomènes d'influence qui se produisent dans l'électrophore sont un peu plus complexes : le moule intervient aussi ; car il faut, pour obtenir un bon fonctionnement, non seulement que le moule soit conducteur, mais qu'il soit en contact permanent avec le sol.

2° *Dans un air sec, le gâteau* de résine de l'électrophore, une *fois électrisé, peut* conserver son électricité pendant des mo-

entiers, et l'on peut obtenir pendant ce temps autant d'étincelles qu'on veut, sans battre de nouveau la résine avec la peau de chat, pourvu qu'on ait soin de faire à chaque fois la manœuvre précédente.

3° Il est avantageux, au point de vue de la quantité d'électricité

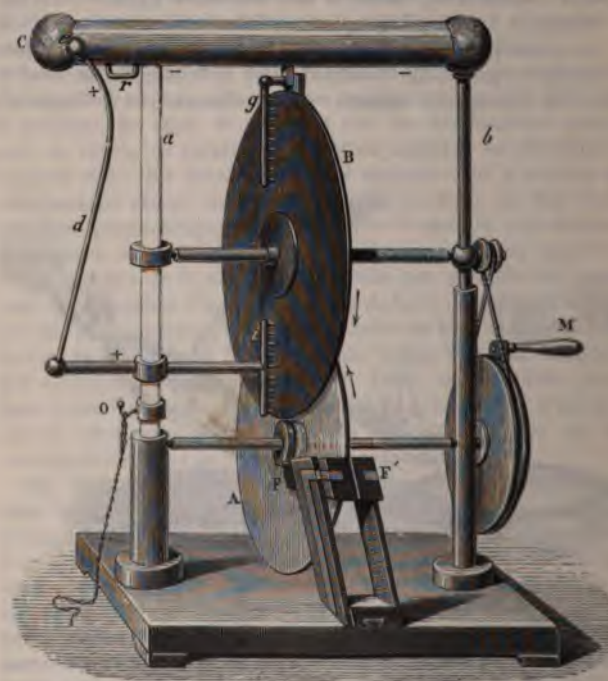


Fig. 773.

développée, de remplacer le gâteau de résine par un disque d'ébonite; mais cette substance a l'inconvénient de perdre presque complètement ses propriétés isolantes par suite de l'oxydation du soufre qui entre dans sa composition[1].

865. **Machine diélectrique de Carré.** — Principe. — La machine, dite *diélectrique*, construite par M. Carré, est combinée de manière à s'amorcer elle-même.

1. On les lui rend en le lavant à la potasse ou à la soude.

Elle se compose de deux plateaux tournant en sens contraires; le plus grand, B, est en ébonite, et le plus petit, A, est en verre (fig. 773). Ils se recouvrent mutuellement des $\frac{2}{3}$ aux $\frac{3}{4}$ de leurs rayons ; et le plateau A tourne lentement au moyen d'une manivelle M, tandis que le plateau B reçoit un mouvement de rotation rapide par l'intermédiaire d'une courroie sans fin qui va d'une grande poulie à une petite. C'est le plateau A qui sert d'inducteur; c'est un inducteur *automatique* et *continu*, puisqu'il s'électrise lui-même *positivement*, en tournant entre les deux frottoirs F, F'. Il agit par induction, à travers le plateau B, sur un peigne *i*, et en soutire l'électricité négative, qui vient se déposer sur le plateau B ; par suite, le conducteur *d*, fixé au peigne, s'électrise positivement. Puis, le plateau B tournant rapidement, son électricité négative vient induire un second peigne *g* et en soutirer l'électricité positive. Le plateau B repasse donc à l'état neutre, tandis qu'un fort conducteur C lié au peigne *g* se charge d'électricité négative.

Des étincelles éclatent alors d'une manière continue entre la boule *e* et le conducteur C, pôles de la machine. Avec des plateaux dont les diamètres respectifs sont de 38 et 49 centimètres, les étincelles peuvent atteindre 15 centimètres. Elles sont plus nourries, lorsqu'on augmente la capacité de la machine en y ajoutant un condensateur auxiliaire, tel qu'une bouteille de Leyde.

866. **Machine électrique de Holtz.** — 1° *Description.* — La machine de Holtz se compose de deux plateaux de verre mince de diamètres inégaux, placés parallèlement (fig. 774), et distants l'un de l'autre de quelques millimètres. Le plus grand, AA, qui a 60 centimètres de diamètre, est maintenu fixe à l'aide de quatre galets de bois *a*, portés par des axes et des pieds de verre. En avant du plateau A est le second plateau, BB, d'un diamètre de 55 centimètres seulement ; il est fixé à un axe horizontal de verre, qui traverse librement une ouverture centrale pratiquée dans le grand plateau. Le plateau B est plein dans toute son étendue, tandis que le plateau A est percé, aux deux extrémités d'un même diamètre, de deux *fenêtres*, F, F'. Le long du bord inférieur de la fenêtre F, sur la face postérieure du plateau, est collée une bande de papier *p* (fig. 776), et sur la face antérieure une languette *n* de carton mince, reliée à la bande *p* par une bandelette de papier, qui passe par-dessus le bord de la fenêtre. Sur la fenêtre F', le bord supérieur est armé de la même manière d'une bande de papier *p'* et d'une languette *n'*. Les bandes *p*, *p'* s'appellent les *armures*. Les deux plateaux, les armures, les languettes (surtout sur leurs bords) sont recouverts d'une couche de vernis à la gomme laque.

En avant du plateau B, à la hauteur des armures, sont deux peignes de cuivre O, O', supportés par deux conducteurs de même métal C, C' (fig. 774). A leurs extrémités antérieures, ceux-ci portent deux boules assez grosses, que traversent deux *tiges de cuivre terminées* par deux boules plus petites, r, r', *et munies de poignées* d'ébonite K, K'. Ces tiges peuvent non

seulement glisser à frottement doux dans les grosses boules, mais tourner avec elles, de manière à être plus ou moins rapprochées et inclinées. La rotation du plateau B s'obtient à l'aide d'une manivelle M et d'une suite de poulies et de courroies sans fin :

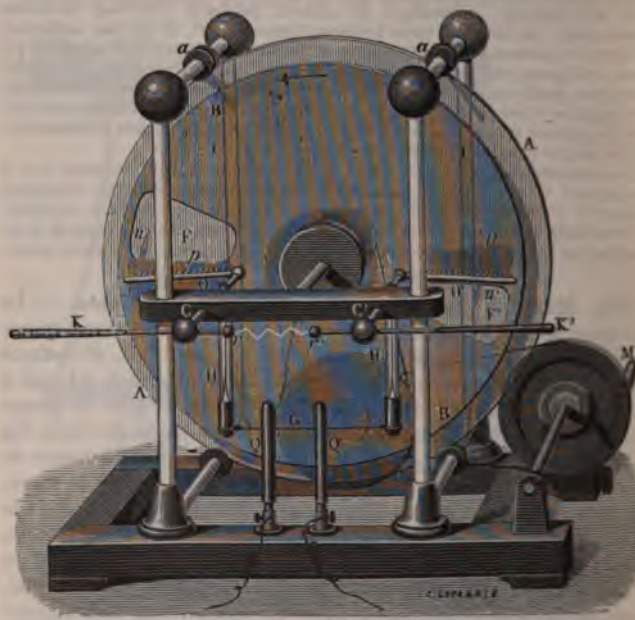


Fig. 774.

sa vitesse est de 12 à 15 tours environs par seconde ; elle doit avoir lieu dans le sens des flèches, c'est-à-dire vers les pointes des languettes n, n' (fig. 776).

2° *Amorçage et fonctionnement.* — Il faut commencer par *amorcer* les armures p, p', c'est-à-dire par les électriser, l'une positivement, l'autre négativement. On prend une plaque d'ébonite, qu'on électrise en la frottant soit avec une peau de chat, soit avec la main ; puis on met en contact les boules r, r', de manière que les deux conducteurs C, C' (fig. 775) n'en fassent qu'un. Approchant alors derrière une des armures, p par exemple (fig. 776), la plaque d'ébonite, qui est négative, on soutire par

la languette *n* l'électricité positive de l'armure, et on la charge d'électricité négative. Cette charge induit de même, à travers le plateau B, à mesure qu'il tourne, les conducteurs OCC'O' (fig. 775), et soutire par le peigne O l'électricité positive : celle-ci se dépose

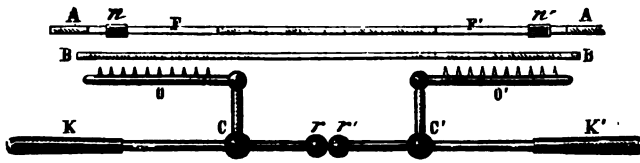


Fig. 775.

sur la face antérieure du plateau mobile, tandis qu'en même temps l'électricité négative, refoulée sur le peigne O', va se déposer, comme la première, sur la partie antérieure du plateau B. Puis les deux électricités sont entraînées par la rotation du plateau, et, au bout d'une demi-révolution, tout le contour

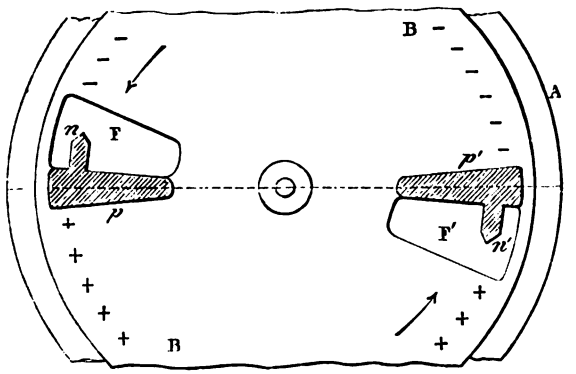


Fig. 776.

inférieur, de *p* en F' (fig. 776), est électrisé positivement, et son contour supérieur, de *p'* en F, négativement. Or, les deux électricités contraires, au-dessous et au-dessus de la fenêtre F', agissant dans le même sens pour décomposer l'électricité neutre de l'armure *p'n'*, la partie *p'* s'électrise positivement, pendant que l'*électricité négative* se dégage par la languette *n'* et vient se *déposer sur la face interne* du plateau B, où, vu la faible épais-

seur de celui-ci, elle neutralise à peu près complètement l'électricité positive déposée sur la face antérieure.

Les deux armures sont alors amorcées et l'on s'en aperçoit par un bruissement caractéristique. Le même effet qu'en F′ se produit en F sur l'armure *pn*, c'est-à-dire que les électricités contraires, au-dessus et au-dessous de *pn*, décomposent une nouvelle quantité d'électricité neutre, et la charge négative de la partie *p* augmente, tandis que l'électricité positive qui se dégage par la languette *n* va neutraliser l'électricité négative venant de F′ vers F; et ainsi de suite jusqu'à ce que, la machine ayant atteint un potentiel maximum, l'équilibre s'établisse entre toutes ses parties. A partir de ce moment, la rotation ne fait plus qu'entretenir le potentiel constant[1]. La machine étant amorcée et la plaque d'ébonite retirée, on écarte les boules *r* et *r′*, à une distance qui dépend de la machine, mais qui peut aisément atteindre 15 à 20 cm : un torrent d'étincelles jaillit d'une manière continue d'une boule à l'autre (fig. 774), à la condition de continuer le mouvement de rotation.

3° *Constantes de la machine.* — A plateaux égaux, la machine de Holtz est très supérieure en débit à la machine ordinaire à frottement.

Elle a aussi un débit plus considérable que celui des autres machines à influence. Cela tient à ce que la charge des inducteurs, au lieu de rester *constante* (comme dans la machine Carré), va au contraire en *augmentant* de plus en plus par le jeu même de l'appareil, jusqu'à ce qu'elle atteigne des valeurs énormes : le *débit* de la machine s'accroît alors dans la même proportion[2]. C'est en cela que consistent l'originalité et la supériorité des machines de Holtz.

4° *Inversion des pôles. — Emploi du conducteur diamétral.* — Si on écarte trop les boules *r* et *r′*, ou si l'on vient à tourner le plateau en sens contraire, la machine se désamorce. Parfois une simple variation de vitesse occasionne une *inversion* des pôles. On a cherché à éviter l'inversion, sans y réussir pleinement, en disposant un conducteur diamétral muni de plaques, fonctionnant comme le conducteur *r r′* de la machine pendant l'amorçage.

5° *Emploi des condensateurs.* — On suspend souvent aux conducteurs C, C′ deux *condensateurs* H, H′ (fig. 774), qui consistent en deux éprouvettes de verre épais, dont les parois intérieures et extérieures sont recouvertes d'une feuille d'étain jusqu'à un cinquième de leur hauteur. Chaque éprouvette est fermée par un bouchon dans lequel passe une tige de cuivre à crochet, communiquant d'un bout à la feuille d'étain intérieure, et suspendue de l'autre à

1. Dans un air parfaitement sec la machine peut fonctionner fort longtemps sans qu'il soit besoin de l'amorcer de nouveau avec la plaque d'ébonite.

2. Pellat, *Conférences sur les machines électriques anciennes et actuelles.* — Association pour l'avancement des sciences.)

un des conducteurs. A l'extérieur, les deux feuilles d'étain sont en communication par un conducteur G. En réalité, ces éprouvettes ne sont autre chose que deux petites bouteilles de Leyde assemblées en cascade (855); elles se chargent, l'une, H, d'électricité négative à l'intérieur et positive à l'extérieur, l'autre, H', d'électricité positive à l'intérieur et négative à l'extérieur. Comme elles se chargent par l'intermédiaire de la machine, et se déchargent au fur et à mesure par les boules *r*, *r'*, elles renforcent l'étincelle.

867. Machine de Wimshurst. — Cette machine toute nouvelle est aussi une machine à influence, qui diffère essentiellement de

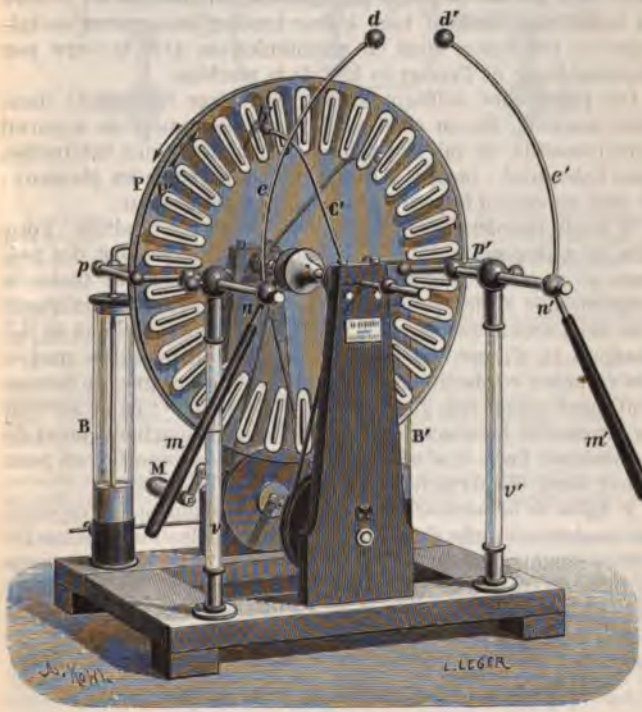


Fig. 777.

celle de Holtz par ce fait qu'elle est *auto-excitatrice*, c'est-à-dire *qu'elle s'amorce d'elle-même.*

1° Description. — Elle se compose (fig. 777) de deux plateaux de

verre, vernis à la gomme laque[1], portant chacun un même nombre pair de secteurs métalliques collés près de la circonférence[2]. Ces deux plateaux reçoivent le mouvement d'un même arbre actionné par une manivelle M, au moyen de poulies et de courroies dont l'une seulement est croisée[3]; les rotations des deux plateaux s'effectuent donc en sens contraire. En regard de chacun d'eux se trouvent des conducteurs diamétraux C et C', inclinés l'un et l'autre de 45° sur l'horizon, mais en sens contraires, de façon à se trouver perpendiculaires entre eux. Leurs extrémités sont garnies de petits pinceaux métalliques appelés *brosses* ou *balais*, qui viennent tour à tour toucher les secteurs métalliques et les mettre ainsi en communication avec la terre par l'intermédiaire de l'axe et du bâti de la machine.

Ces pièces sont suffisantes pour engendrer l'électricité dans cette machine. Si, en effet, on met en mouvement un appareil ainsi constitué, on voit se produire les manifestations habituelles dans l'obscurité : lueurs, aigrettes, décharges entre les plateaux; de plus on entend le petit bruissement caractéristique.

Il s'agit maintenant de recueillir l'électricité produite. Pour cela on a disposé à droite et à gauche horizontalement des peignes *p* et *p'* qui embrassent les deux plateaux sur toute la longueur des secteurs métalliques; ces peignes communiquent avec deux arcs métalliques *e* et *e'* terminés par des boutons de décharge *d* et *d'*, que l'on peut écarter plus ou moins au moyen des manches en ébonite *m* et *m'* (fig. 777). Les peignes ne paraissent jouer aucun rôle générateur de l'électricité[4]; ils ne servent qu'à *recueillir* les électricités séparées par le fonctionnement de la machine. En *n* et *n'* sont deux bornes dans lesquelles on peut pincer deux fils permettant de transmettre l'électricité.

2° *Effets de la machine.* — Lorsqu'on veut augmenter la capacité des conducteurs, afin d'obtenir des étincelles plus nourries, on les met en communication avec les condensateurs B et B', au moyen de tiges en cuivre que l'on peut à volonté mettre ou supprimer (fig. 778). On obtient une série d'étincelles bruyantes, de 10 à 15 cm de longueur, les plateaux tournant à une vitesse de 250 à 500 tours par minute, soit 75 à 80 tours pour la manivelle.

1. On fait quelquefois ces plateaux en ébonite, substance moins fragile que le verre; mais l'ébonite a non seulement l'inconvénient déjà signalé de perdre ses propriétés isolantes sous l'influence de la lumière, mais aussi celui de se déformer par la chaleur.
2. Ce nombre importe peu d'ailleurs; dans le modèle représenté il y en a 54.
3. C'est par erreur que la courroie d'arrière est représentée croisée.
4. Il n'en est pas de même pour la machine de Holtz.

Cette machine a sur toutes les autres l'immense avantage de fonctionner par tous les temps, même les plus humides; c'est véritablement une rareté de la voir refuser de s'amorcer.

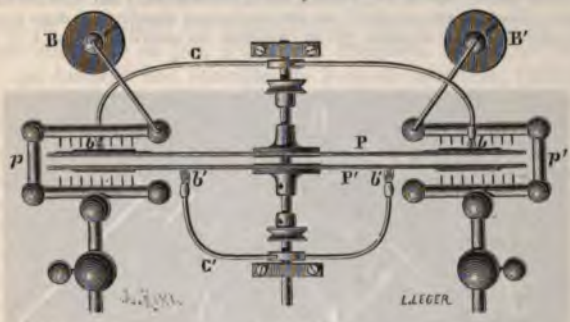


Fig. 778.

3° *Théorie.* — Reportons-nous au diagramme ci-joint (fig. 779) : les plateaux P et P' sont figurés par des sections de cylindres; b_1 C b_2 et b'_1 C' b'_2 sont les conducteurs diamétraux, S et S' les secteurs métalliques (on en a représenté six seulement sur chaque plateau pour simplifier la figure); *p* et *p'* sont les peignes qui communiquent aux boutons de décharge *d* et *d'* par les arcs conducteurs *e* et *e'*. L'expérience prouve que nous n'avons pas à nous occuper des peignes au point de vue du développement de l'électricité.

Cette machine, avons-nous dit, est auto-excitatrice. Toutefois on ne comprend pas qu'il y ait production d'électricité si l'on n'admet pas l'existence préalable d'une petite charge, si faible soit-elle. Cela revient à admettre qu'il n'y a pas dans l'atmosphère deux corps qui se trouvent au même potentiel, surtout s'ils sont isolants ou supportés par des isolants. On sait, en effet, qu'il suffit d'approcher d'un électroscope sensible un corps isolant quelconque pour observer presque toujours des traces d'électrisation. Nous supposerons donc que la moitié ADB du plateau P' possède une faible charge positive et l'autre moitié BEA une faible charge négative.

L'influence de la charge positive induira sur les secteurs du plateau P, qui marchent à l'encontre, une charge négative dans la région la plus rapprochée, c'est-à-dire contre le verre : une charge égale positive sera simultanément repoussée à la surface. Mais, au fur et à mesure que les secteurs passent sous le balai b_1, cette charge est refoulée dans le sol, et les secteurs restent électrisés négativement. La région BEA produira l'effet inverse et, pour la même raison, les secteurs de P resteront électrisés positivement après leur passage sous le balai b_2. Ainsi les deux moitiés du plateau P', séparées par son conducteur diamétral, ont induit sur les deux moitiés du plateau P séparées par le conducteur b_2 Cb_1 des charges électriques contraires.

De même, les charges positives de la portion EAD du plateau P réagiront sur les secteurs du plateau P' qui marchent à l'encontre; par conséquent, après leur passage sous le balai b'_1, les secteurs porteront une nouvelle charge négative, de l'électricité positive en égale quantité étant refoulée dans le sol par le conducteur C'. Après leur passage sous le balai b'_2, ils acquerront au contraire une nouvelle charge positive par suite de l'influence des charges négatives

répandues sur la portion DBE du plateau P. Les deux plateaux réagiront mutuellement et augmenteront ainsi leurs charges, jusqu'à la limite fixée par la déperdition. A ce moment, pendant un instant quelconque, les charges gagnées par l'induction mutuelle seront égales aux charges dissipées par les fuites.

Le diagramme représente, d'après cette explication, l'état électrique des plateaux. Chacun d'eux est divisé par son conducteur diamétral en deux régions, l'une positive, l'autre négative. Si l'on considère les quatre quadrants I, II, III et

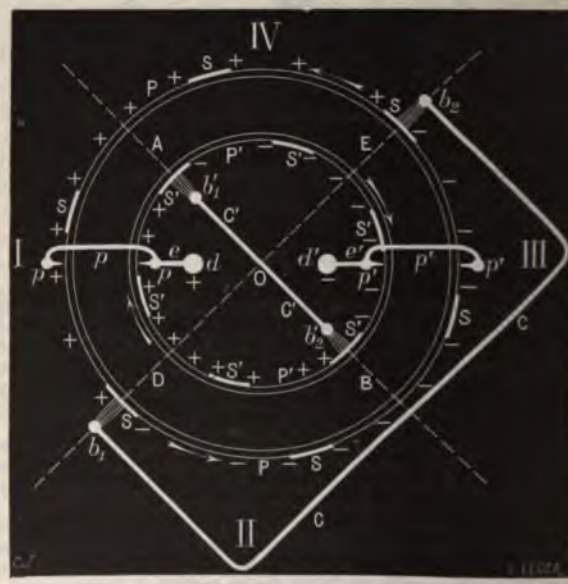


Fig. 779.

IV, on voit que les charges en II et IV sont de signes contraires, et s'attirent par conséquent; dans I et III elles sont de même signe, et par suite se repoussent. Les peignes collecteurs pourront donc les soutirer par leurs pointes. Le bouton *d* sera chargé positivement et le bouton *d'* négativement.

Remarque. — Comme les peignes ne jouent pas de rôle dans la production de l'électricité de cette machine, on voit qu'il est indifférent de rapprocher ou d'écarter les arcs *e* et *e'* pour la mise en marche. On s'explique aussi qu'il soit impossible d'avoir une inversion de courant, même dans le cas où l'on écarterait les boutons de décharge au delà de la distance explosive.

868. Remarques sur la théorie des machines électrostatiques. — Les théories actuelles des machines électrostatiques sont *incomplètes*, en ce sens qu'elles ne rendent pas compte de tous

les faits observés. Elles n'ont été l'objet que d'un petit nombre d'expériences précises. Ce sont des sources d'électricité à *potentiel élevé* et d'un *faible débit*.

La valeur du potentiel maximum dépend de la forme de la machine, de l'isolement des conducteurs, enfin de la puissance mécanique utile mise en jeu. D'après M. Thomson, les bonnes machines qui donnent des étincelles de 3 cm de longueur, établissent entre leurs pôles une différence de potentiel à peu près égale à celle d'une pile constituée par 50 000 à 80 000 éléments Daniell associés en série. Ce potentiel peut même être dépassé avec certaines machines, mais on peut l'admettre, comme une moyenne, pour les machines qui servent à charger les batteries électriques.

On peut faire porter la différence de potentiels sur un seul pôle en mettant l'autre au sol.

Dans toutes les machines électrostatiques, l'*électricité positive* s'écoule des peignes sous la forme de *houppes violettes* (très visibles dans l'obscurité), qui *vont à la rencontre du plateau tournant*, c'est-à-dire qui s'échappent en sens inverse du mouvement de rotation du plateau. L'*électricité négative* se manifeste tout autrement aux pointes qui la laissent écouler : elle prend l'apparence de petites *étoiles* lumineuses, également *violettes*.

Le conducteur qui communique avec les peignes *positifs* est le *pôle négatif* de la machine ; celui qui communique avec les peignes *négatifs* en est le *pôle positif*.

CHAPITRE VIII

EFFETS DES MACHINES ÉLECTRIQUES ET DES CONDENSATEURS. EXPÉRIENCES CLASSIQUES.

EFFETS DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

869. **Étincelle électrique.** — *Production.* — Un des premiers phénomènes qu'on observe lorsqu'on expérimente avec une machine électrique, est la vive étincelle qu'on tire des conducteurs lorsqu'on en approche la main. On a déjà vu que la cause de ce phénomène est l'action par influence qu'exerce l'électricité positive de la machine sur l'électricité neutre de la main. Cette électricité étant décomposée, l'attraction entre les électricités contraires de la machine et de la main finit par l'emporter sur la résistance de l'air ; à ce moment, les deux électricités se recomposant avec bruit et lumière, l'étincelle apparaît,

vive, instantanée, et accompagnée d'une piqûre plus ou moins forte, selon la puissance de la machine.

Forme. — La forme de l'étincelle est variable. Si elle éclate à une faible distance, elle est rectiligne (fig. 780). Au delà de 6 à 7 centimètres de longueur, l'étincelle devient irrégulière et présente la forme d'une courbe sinueuse, accompagnée de ramifications très déliées (fig. 781). Enfin, si la décharge est très forte, l'étincelle apparaît sous la forme d'un zigzag (fig. 782). (Ce sont les deux dernières formes que présentent les *éclairs*.) Elle peut également affecter la

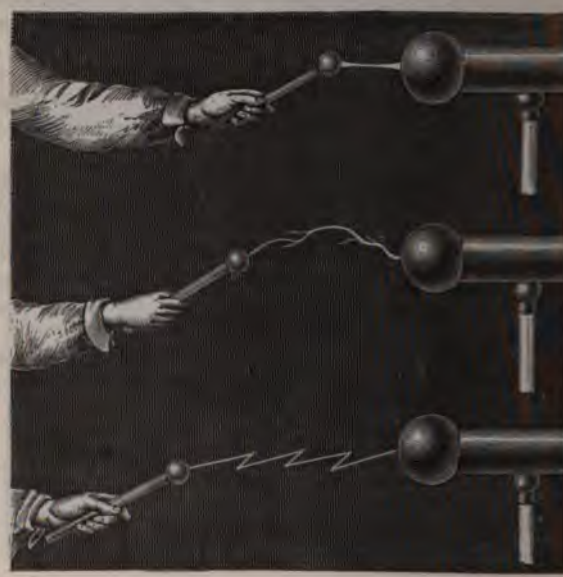


Fig. 780, 781 et 782.

forme d'*aigrette* (fig. 783). Nous avons vu (516) que la photographie instantanée a permis de fixer la forme réelle des étincelles et des éclairs (fig. 527 et 528).

Durée. — Wheatstone, en Angleterre, avait déjà réussi à rendre appréciable la durée de l'étincelle électrique par la méthode du miroir tournant, appliquée par Foucault à la mesure de la vitesse de la lumière.

Plus tard, Arago put rendre sensible la durée des éclairs, au moyen d'un disque métallique tournant autour d'un axe perpendiculaire à son plan, divisé dans le sens des rayons et à des intervalles égaux, par des ouvertures longitudinales très étroites. En regardant les éclairs à travers ce disque, tournant à une vitesse connue, on voyait les traits d'autant plus larges que la durée de l'éclair était plus grande.

Enfin, MM. Lucas et Cazin ont imaginé un instrument, le chronoscope à étincelles électriques, qui permet de mesurer la durée de l'étincelle en millio-

nièmes de seconde. Ils expérimentaient en établissant une distance de 5 millimètres entre deux boules, chargées par les armatures d'une batterie électrique.

Ils trouvèrent que la durée de l'étincelle croît avec le nombre des jarres (de 0,000026 sec. pour 2 jarres à 0,000055 sec. pour 8), qu'elle augmente aussi avec la distance des deux pôles, mais qu'elle est indépendante du diamètre des boules entre lesquelles l'étincelle éclate.

Dans les machines électriques, la durée de l'étincelle est tellement petite, qu'on ne peut même pas l'apprécier avec le chronoscope.

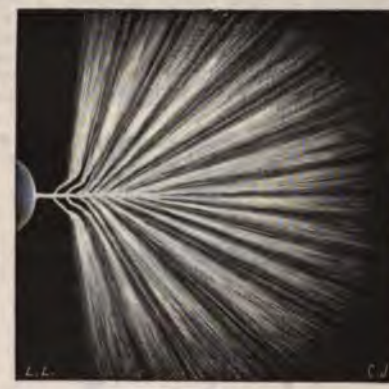


Fig. 783.

Distance explosive. — On appelle ainsi la *distance maximum* à laquelle peut se produire l'étincelle entre deux conducteurs électrisés. La distance explosive entre deux conducteurs électrisés est sensiblement *proportionnelle à la différence de potentiels* de ces deux conducteurs. Elle dépend aussi du rayon des boules entre lesquelles on fait jaillir l'étincelle.

870. Expériences du tabouret électrique. — L'étincelle électrique se présente sous un aspect remarquable lorsque c'est du corps humain qu'on la fait jaillir[1]. On isole la personne sur un tabouret à pieds de verre, dit *tabouret électrique*; puis on lui fait poser une main sur l'un des conducteurs de la machine. Le corps humain conduisant bien l'électricité, à mesure que la machine se charge, l'électricité se distribue sur le corps de la personne en même temps que sur les conducteurs, en sorte que, si on la touche sur les mains, sur la figure ou sur les vêtements, on en tire des étincelles comme de la machine elle-même. Tant qu'on n'approche pas la main de la personne isolée, elle n'éprouve aucune commotion, quoiqu'elle soit fortement électrisée; mais ses cheveux se hérissent et se dirigent vers les corps qu'on leur présente, et elle ressent, sur les mains et sur la figure, un souffle léger, qui est un effet de la répulsion de l'air, à mesure qu'il s'électrise par contact.

On peut encore électriser une personne, isolée sur le tabouret à pieds de verre, en la frappant avec une peau de chat; elle attire alors le pendule électrique et donne des étincelles à l'approche de la main. Si la personne qui tient la peau de chat monte elle-même sur un second tabouret isolant, les deux expérimentateurs sont électrisés, l'un positivement, l'autre négativement.

871. Carillon électrique. — Le *carillon électrique* est un petit appareil composé de trois timbres métalliques suspendus à une tringle horizontale qu'on met en communication avec la machine électrique (fig. 784). Les timbres A et B pendent par des chaînes métalliques qui établissent la communication

1. C'est Dufay, physicien français, qui le premier, en 1734, tira une étincelle du corps humain.

avec la tringle, tandis que le timbre du milieu pend par un fil de soie qui l'isole de la machine; mais il communique avec le sol au moyen d'une chaîne. Enfin, entre le timbre du milieu et les deux autres sont deux petites boules de cuivre suspendues par des fils de soie.

Lorsqu'on charge la machine, les timbres A et B, s'électrisant positivement, attirent les boules, puis les repoussent dès qu'il y a eu contact. Or celles-ci, se trouvant alors

Fig. 784.

Fig. 785.

électrisées positivement, se portent vers le timbre C, qui, quoique en communication avec le sol, est chargé d'électricité négative par l'influence des deux autres. Aussitôt après le contact, les boules sont donc repoussées vers les timbres A et B, et exécutent un mouvement de va-et-vient rapide et des chocs successifs qui font résonner les trois timbres tout le temps que la machine est chargée.

872. **Tourniquet électrique; vent électrique.** — On nomme *tourniquet électrique* un petit appareil qui rend manifeste le *pouvoir des pointes*. Il se compose

Fig. 786.

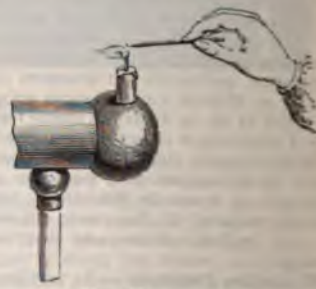


Fig. 787.

de cinq ou six rayons métallique recourbés tous dans le même sens, terminés en pointe et fixés à une chape commune, mobile sur un pivot (fig. 786). Cet appareil étant posé sur la machine électrique, aussitôt que celle-ci se charge, les rayons et la chape prennent un mouvement de rotation rapide dans la

direction opposée aux pointes. Ce mouvement est dû à la répulsion qui s'exerce entre l'électricité s'écoulant des pointes et l'électricité de même nom qu'elles communiquent à l'air. En effet, le tourniquet n'entre point en mouvement dans le vide, et si l'on approche la main tandis qu'il tourne dans l'air, on sent un souffle léger, qui est dû au déplacement de l'air électrisé et qu'on désigne sous le nom de *vent électrique*.

Ce vent électrique n'est pas seulement sensible à la main, il peut souffler et même éteindre la flamme d'une bougie, du moins lorsqu'il provient d'une puissante machine électrique (fig. 786).

On obtient le même effet en posant la bougie sur l'un des conducteurs et en lui présentant une pointe métallique qu'on tient à la main (fig. 787). Le courant provient, dans ce dernier cas, de l'électricité contraire qui se dégage de la pointe métallique par l'influence de la machine.

873. Réversibilité des machines électriques — On peut (fig. 788) transformer en travail mécanique l'énergie électrique emmagasinée dans une bouteille de Leyde B ; on opère comme il suit [1] :

1° L'armature intérieure de la bouteille B est électrisée positivement et communique avec un disque en aluminium A par l'intermédiaire des tiges métalliques t'', t'. Un gâteau de résine, électrisé négativement, et placé parallèlement au-dessous du disque, porte en son centre un bouton de cuivre relié à la terre T. Il y a évidemment attraction entre le gâteau et le disque A. Celui-ci, qui est suspendu par une tige isolante I à un ressort convenable R fixé à la potence t, s'abaisse sous l'influence de cette attraction. D'abord au potentiel de B, il se déplace *à charge constante* jusqu'au moment où il vient toucher le bouton du gâteau, et il prend à cet instant le potentiel zéro ; après quoi il est rappelé, à charge constante, au contact de t' par la réaction du ressort R. L'organe mobile a alors accompli une période d'oscillation, qu'il répète aussi longtemps qu'il y a en B une charge suffisante.

Fig. 788.

Ce mouvement de va-et-vient du disque peut être aisément transformé en *un mouvement de rotation*. Il est clair que l'appareil est réversible, car, en

1. *Expériences empruntées* au Cours de M. G. Lippmann.

manœuvrant l'électrophore à la main, il est possible de charger une bouteille de Leyde.

2° On peut montrer directement la réversibilité au moyen de machines à influence : en reliant leurs pôles et en faisant fonctionner l'une d'elles comme *génératrice d'énergie électrique*, l'autre se met alors à tourner, et peut accomplir un travail ; elle fonctionne alors comme *moteur*. Avec deux machines Winshurst l'expérience est facile à réaliser. On peut également utiliser des machines à influence quelconques ; mais les machines à frottement ne se prêtent évidemment pas à cette expérience.

EFFETS DES CONDENSATEURS.

874. **Effets divers des décharges électriques.** — C'est avec les condensateurs, surtout avec les bouteilles de Leyde et les batteries, qu'on manifeste le mieux les effets de l'électricité statique. Ces effets sont très variés ; on peut les diviser, suivant la nature des phénomènes qu'ils produisent, en *effets physiologiques, lumineux, calorifiques, mécaniques* et *chimiques*. Il y a également lieu de classer les décharges en disruptives et conductives. Dans les premières, l'énergie électrique est spécialement utilisée dans l'étincelle. Dans les secondes, ce sont les conducteurs à travers lesquels s'effectuent les décharges qui reçoivent la plus grande partie de l'énergie libérée.

875. **Effets physiologiques.** — Les *effets physiologiques* sont ceux que l'électricité produit sur les êtres vivants, ou même sur les animaux récemment morts. Ils consistent, chez les premiers, en une excitation violente de la sensibilité et de la contractilité des tissus organiques que la décharge traverse, et chez les derniers en contractions musculaires brusques qui simulent le retour à la vie. Il ne sera question, pour le moment, que des actions physiologiques exercées par l'électricité à haut potentiel.

La commotion que donne l'étincelle électrique acquiert une grande intensité et un caractère particulier quand c'est de la bouteille de Leyde qu'on la tire, en touchant d'une main son armature extérieure et de l'autre son armature intérieure. Avec une petite bouteille, la commotion se fait sentir jusque dans le coude ; avec une bouteille de plus grande capacité, on la ressent jusque dans l'épaule, et jusque dans la poitrine avec des bouteilles plus grandes encore.

La bouteille de Leyde peut donner la commotion électrique à un très grand nombre de personnes simultanément. Pour cela, celles-ci doivent *former la chaîne*, c'est-à-dire se donner la main d'une manière continue ; puis, la première touchant l'armature extérieure d'une bouteille chargée, et la dernière touchant en même temps le bouton de l'armature intérieure, toutes reçoivent simultanément la commotion, qu'on gradue à volonté en chargeant plus ou moins la bouteille. Dans cette expérience, à cause de la déperdition dans le sol, les personnes qui sont au milieu de la chaîne éprouvent une commotion moins vive que celles des extrémités rapprochées de la bouteille.

Avec les grandes bouteilles de Leyde et les batteries, la commotion ne peut plus être subie impunément.

876. **Effets lumineux dans les gaz raréfiés : Lueurs et décharges dans l'œuf électrique.** — La recomposition des deux électricités à forte tension s'opère toujours avec dégagement de lumière et donne lieu aux *étincelles, aigrettes* ou *lueurs* qu'on tire des machines électriques, de la bouteille de Leyde et des *batteries*. L'éclat de la lumière est d'autant plus vif que les corps entre lesquels a lieu l'explosion sont meilleurs conducteurs, et sa couleur varie non seulement avec la nature de ces corps, mais avec celle de l'atmosphère ambiante et la pression.

On étudie les effets de la pression extérieure, dans l'obscurité, au moyen de

l'*œuf électrique*. On nomme ainsi un globe de verre porté sur un pied de cuivre, dans lequel sont deux tiges de laiton terminées en boule (fig. 789). La tige inférieure glisse à frottement dans une boîte à cuir, de manière à pouvoir être rapprochée ou écartée à volonté. Le vide étant fait dans le globe, à 1 ou 2 millimètres, on fait communiquer la tige supérieure avec une source électrique à haut potentiel, et le pied avec le sol : on observe, d'une boule à l'autre, une lumière purpurine peu intense et continue; l'éclat augmente vers les extrémités, surtout vers la boule positive; la boule négative ainsi que la tige qui la porte sont entourées d'une lumière violacée.

Si on laisse rentrer l'air peu à peu, la lumière redevient blanche et brillante, et finit par se réduire à la forme d'étincelle.

La lueur qui semble partir du pôle positif est rose dans l'air raréfié; elle est blanche si l'œuf renferme de l'acide carbonique et bleu-violacé avec l'hydrogène.

Fig. 789.

Fig. 790.

Dans un gaz plus raréfié apparaissent les décharges dites *stratifiées*, formées de bandes alternativement brillantes et obscures.

877. **Effets lumineux dans le vide : Phénomènes de Crookes.** — Dans un vide plus parfait, on voit des phénomènes nouveaux : les lueurs disparaissent et la fluorescence du verre, exaltée sur la paroi opposée à l'électrode négative, indique seule le passage de l'électricité.

Tout se passe comme si les molécules restantes étaient électrisées, puis lancées dans une direction normale à l'électrode négative. En arrêtant au moyen d'une croix en aluminium les molécules *bombardées* (fig. 790), la fluorescence est détruite sur le verre dans les directions qui rencontrent l'obstacle et une ombre de la croix apparaît sur le verre. On peut utiliser l'énergie du *bombardement* pour mettre en mouvement un petit moulinet supporté par deux traverses en verre, pour produire de superbes effets de fluorescence, etc.

878. **Effets lumineux ordinaires : Bouteille, tube et carreau étincelants.** — On montre les effets lumineux dans l'air, à la pression ordinaire, avec plusieurs petits appareils : la *bouteille étincelante*, le *tube étincelant*, le *carreau magique*, etc.

La *bouteille étincelante* est une bouteille de Leyde dont l'armature extérieure est formée d'une couche de vernis sur laquelle on a répandu de la limaille de cuivre. Une bande d'étain, collée au bord inférieur de la bouteille, est en communication avec le sol au moyen d'une chaîne de métal (fig. 791); une seconde bande, placée plus haut, porte un appendice arrivant à 2 centi-

Fig. 791.

tain presque en contact avec une mac
l'autre extrémité avec le sol. Dès que

chaleur très intense. En traversant les liquides combustibles, comme l'alcool, l'éther, elle les enflamme. La décharge d'une bouteille de Leyde ordinaire suffit pour enflammer de l'éther placé dans un petit vase de verre dont le fond est traversé par une tige de cuivre à bouton, fixée à un pied de même métal (fig. 794). Pour réussir facilement la même expérience avec l'alcool, il faut d'avance chauffer un peu le liquide.

Fig. 793.

Fig. 794.

Lorsqu'on fait passer la décharge d'une batterie dans un fil de fer, il devient rouge blanc, fond et brûle avec une lumière éblouissante. Les fils de platine d'or, d'argent sont fondus et volatilisés.

Portrait de Franklin. — Si l'on soumet à la décharge d'une batterie une

Fig. 795.

feuille d'or, isolée entre deux lames de verre ou entre deux rubans de soie, l'or est volatilisé, et l'on a pour résidu une poudre violette, qui n'est autre chose que de l'or très divisé. C'est ainsi qu'on obtient les *portraits électriques*.

Une *feuille de carton mince* étant taillée comme on le voit en *abm* (fig. 795), *on découpe à jour, en son milieu*, le portrait qu'on veut reproduire; puis on

colle sur ses extrémités deux bandes d'étain *a* et *b*. Sur la découpure on pose une de ces feuilles d'or extrêmement minces que préparent les batteurs d'or, en ayant soin qu'elle déborde sur les deux feuilles d'étain ; puis, après avoir rabattu la portion *m* du carton sur la feuille d'or, on place le tout sur une étoffe de soie blanche dans une presse de bois P. Il suffit alors de faire passer de *a* en *b* la décharge d'une batterie peu puissante pour que l'or volatilisé aille former sur la soie, à travers la découpure, un dépôt brun qui en reproduit le dessin. (C'est ordinairement le portrait de Franklin.)

880. **Effets calorifiques : Thermomètre de Riess.** — Riess a montré aussi la chaleur dégagée dans une décharge *conductive*. Celle-ci s'effectuait à travers une spirale formée d'un fil de platine très fin *a b* logée à l'intérieur d'un ballon (fig. 796). Le col du ballon, recourbé en forme de tige thermométrique, contient

Fig. 796.

un liquide qui est chassé, au moment de la décharge, par la brusque expansion de l'air échauffé. On peut évaluer le déplacement au moyen d'une graduation portée par une planchette A que l'on peut incliner de façon à faire varier la sensibilité de la mesure.

881. **Effets mécaniques.** — Des déchirements, des ruptures, des expansions violentes résultent du passage d'une forte décharge électrique dans les corps peu conducteurs. Le verre est percé ; le bois, les pierres sont brisés ; les gaz et les liquides sont fortement ébranlés. Ces *effets mécaniques* de l'étincelle électrique se montrent au moyen de différents appareils classiques : nous citerons le *perce-verre* et le *perce-carte*.

Experience du perce-verre. — L'appareil se compose de deux colonnes de verre qui supportent, au moyen d'une traverse horizontale, un conducteur B, terminé en pointe (fig. 797). La lame de verre A, qu'il s'agit de percer, repose sur un cylindre de verre, dans lequel est un second conducteur, également terminé en pointe. Celui-ci étant mis en communication, par un fil métallique, avec l'armature extérieure d'une forte bouteille de Leyde, on approche le crochet de la bouteille du bouton qui termine le conducteur B. L'étincelle éclate alors entre les deux conducteurs, et le verre est percé.

Si la lame de verre était épaisse, on ne réussirait à la percer qu'avec la décharge d'une batterie.

Expérience du perce-carte. — Le même appareil sert très bien de perce-carte : il suffit de substituer une feuille de carton à la lame de verre employée précédemment.

882. Effets chimiques. — Les effets chimiques de l'électricité consistent en combinaisons et en décompositions produites sur le passage de l'étincelle électrique dans les corps qu'elle traverse. Ces effets paraissent dus à la haute température que fait naître le passage de l'étincelle.

Un grand nombre de gaz sont décomposés par l'action prolongée de l'étincelle électrique. L'hydrogène carboné, l'acide sulfhydrique, l'ammoniaque, le sont complètement; l'acide carbonique ne l'est qu'incomplètement, en oxygène et en oxyde de carbone. L'étincelle statique décompose même les oxydes, l'eau et les sels; mais elle est loin de produire des effets chimiques aussi énergiques et aussi variés que les courants électriques des piles et des machines d'induction.

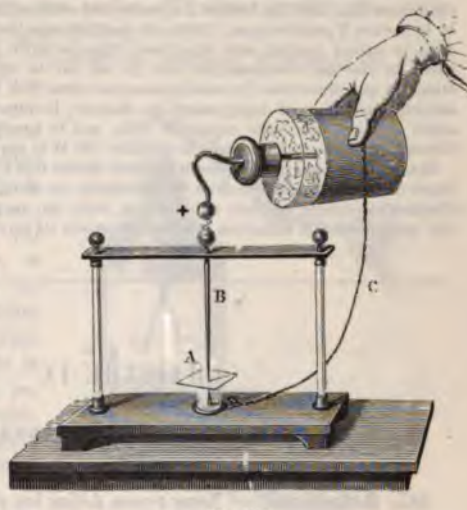


Fig. 797.

Expérience du pistolet de Volta. — On appelle *pistolet de Volta* un petit

Fig. 798.

Fig. 799.

appareil qui sert *à montrer* les combinaisons par l'étincelle électrique. Il se *compose d'un petit vase de fer-blanc* (fig. 798), dans lequel on introduit un *mélange détonant formé* de 2 volumes d'hydrogène et de 1 volume d'oxygène;

puis on le ferme hermétiquement avec un bouchon de liège. La paroi latérale est munie d'une tubulure dans laquelle passe une tige métallique terminée par deux petites boules A et B, et mastiquée dans un tube de verre, qui l'isole du reste de l'appareil. Tenant celui-ci à la main, on l'approche d'une machine électrique (fig. 799). Le bouton A s'électrisant alors négativement par influence, et le bouton B positivement, l'étincelle part entre le bouton A et la machine, et, dans le même instant, une deuxième étincelle jaillit entre le bouton B et la paroi du vase qui communique avec le sol par la main. C'est cette dernière étincelle qui détermine la combinaison des deux gaz. Cette combinaison étant accompagnée d'un vif dégagement de chaleur, la vapeur d'eau qui prend naissance acquiert une force expansive telle, que le bouchon est projeté avec une détonation analogue à un coup de pistolet : de là le nom de l'appareil.

Remarque. — L'emploi des condensateurs donne lieu à une foule d'autres *effets* importants que les expériences de Helmholtz, de Herz, de Lodge, de Tesla, et d'autres physiciens, ont mis en évidence, mais qui ne peuvent pas être séparés des phénomènes d'induction à la suite desquels ils seront exposés.

CHAPITRE IX

ÉLECTROSCOPES ET ÉLECTROMÈTRES.

883. **Définitions.** — Nous avons défini les *électroscopes* (798) et nous nous sommes déjà servis de quelques-uns, le pendule électrique, à une balle ou à deux balles, et l'électroscope à feuilles d'or (fig. 750). Quant aux *électromètres*, ce sont des appareils qui servent à *mesurer* les *différences de potentiels*. On distingue les *électromètres absolus*, qui permettent d'évaluer les potentiels immédiatement en *unités absolues* (balance de Coulomb, électromètre sphérique de Lippmann, électromètre absolu de Thomson), et les *électromètres relatifs*, auxquels on ne demande que de la sensibilité.

Le plus commode et le plus classique des électroscopes est l'*électroscope à feuilles d'or*, que nous allons décrire en détail.

884. **Électroscope à feuilles d'or.** — Cet appareil consiste essentiellement en une tige de laiton verticale, terminée en haut par une boule *b* de même métal, et en bas par deux feuilles d'or battu *f*, *f*, très légères[1]. Cette tige passe à frottement dans le bouchon P (qu'il est bon de prendre en paraffine) d'une cloche de verre (fig. 750), reposant sur un plateau quelconque; cette

1. Au lieu des feuilles d'or on peut prendre deux pailles très minces : l'électroscope est dit alors à pailles.

cloche sert à la fois de support et d'enveloppe protectrice pour l'instrument. On recouvre le bouchon d'un couvercle A, afin d'éviter le dépôt des poussières, lorsque l'appareil n'est pas en expérience. Un modèle plus ancien d'électroscope à feuilles d'or est représenté par la figure 800.

Opération et théorie. — Lorsqu'on approche lentement du bouton un corps chargé d'une électricité quelconque, négative par exemple, cette électricité, décomposant par influence le fluide neutre du conducteur, l'électricité positive est attirée dans la boule, et l'électricité négative repoussée vers les feuilles d'or *n*, *n*. Celles-ci, se trouvant ainsi chargées de la même électricité, se repoussent mutuellement, et leur divergence prouve que le corps A est électrisé (fig. 800).

Fig. 800.

Pour reconnaître la nature de son électricité, on commence par charger l'électroscope avec le corps lui-même. Pour cela, tandis que l'instrument est sous l'influence du corps A, on touche le bouton C avec le doigt : l'électricité de même nom est alors repoussée dans le sol, et la boule reste chargée d'une électricité *contraire* à celle du corps. Les feuilles d'or retombent d'abord, toute l'électricité étant en C; mais si l'on retire le doigt et ensuite le corps A, elles divergent de nouveau. Il reste à constater l'espèce d'électricité que conserve l'appareil.

On approche de loin et *lentement* de la boule un bâton de verre chargé positivement. Si la divergence des feuilles d'or augmente, c'est que l'électricité de la tige est repoussée à la partie inférieure : d'où l'on conclut qu'elle est de même espèce que celle du verre, c'est-à-dire positive. Si la divergence diminue, c'est que l'électricité de l'appareil est attirée par celle du verre : elle est donc de nom contraire, c'est-à-dire négative.

Remarques. — 1° On arrive encore à reconnaître l'espèce d'électricité que possède un corps en chargeant d'abord l'électroscope d'une électricité *connue*. Si ensuite les feuilles d'or divergent

quand on approche le corps, son électricité est de même nom que celle de l'électroscope.

2° Il est inutile de dessécher l'air sous la cloche, en y plaçant une capsule contenant de la chaux vive ou toute autre matière avide d'eau lorsqu'on emploie un bouchon de paraffine. Nous avons vu qu'on peut même placer sous la cloche une assiette pleine d'eau sans augmenter la déperdition.

885. **Électromètre de Henley.** — C'est une sorte de pendule électrique destiné à indiquer les progrès de la charge d'un conducteur et en particulier des batteries électriques. Il se compose d'une tige de bois *d* à laquelle est fixé un cadran d'ivoire *c* (fig. 801). Au centre de ce dernier est un axe autour duquel tourne une aiguille de baleine, terminée par une boule de moelle de sureau *a*. L'instrument est ordinairement vissé sur l'un des conducteurs d'une *machine électrique*. A mesure que celle-ci se charge, l'aiguille diverge et elle monte jusqu'à ce que le maximum de charge soit atteint. Il n'y a pas d'ailleurs de relation simple entre l'inclinaison du pendule et la valeur du potentiel. C'est pourquoi l'appareil est improprement appelé *électromètre* : ce n'est qu'un électroscope de sécurité.

Fig. 801.

886. **Balance de Coulomb.** — Le premier électromètre précis fut la balance de Coulomb. Pour mesurer avec cet appareil le potentiel V d'un conducteur électrisé, on relie par un fil long et fin la balle fixe *m* de la balance (fig. 730) à un point quelconque du corps : le potentiel de la balle fixe, mesuré par sa charge, est égal au potentiel du corps étudié. On sait, en effet, que si *q* est la charge commune, donnée à la balle mobile *n* (celle qui est à l'extrémité de l'aiguille *pn*) et à la balle fixe, si *f* est la répulsion, mesurée par l'angle de torsion, et *d* la distance des centres, on a

$$f = \frac{q^2}{d^2}, \qquad \text{d'où l'on déduit} \qquad q = d\sqrt{f}.$$

Enfin, si *r* est le rayon de la balle, on a

$$V = \frac{q}{r} = \frac{d}{r}\sqrt{f}.$$

887. Unités de potentiel; unité absolue et unité pratique (*volt*). — La formule précédente exprime V en fonction de la masse électrique q ou de la force électrique f et des longueurs d et r : cela prouve qu'on peut évaluer les potentiels (comme les masses électriques) avec les mêmes unités que les autres grandeurs physiques.

L'unité de potentiel, rapportée aux unités C. G. S., s'appelle *unité absolue* de potentiel. Cette unité étant beaucoup trop petite pour des applications pratiques, on a choisi une *unité secondaire* qui vaut *cent millions* d'unités absolues et qu'on a appelée le *volt*[1]. On évaluera donc et l'on comptera soit les potentiels, soit les différences de potentiel en *volts*, comme on évalue les quantités d'électricité en *coulombs*, et les capacités électriques en *farads*.

888. Électromètre sphérique absolu de M. Lippmann. — *Principe.* — Une sphère creuse T (fig. 802) est coupée en deux parties par un plan diamétral. L'hémisphère inférieur est supporté par un pied isolant, l'hémisphère supérieur, en communication avec le premier, est suspendu au plateau d'une balance, par l'intermédiaire d'un fil isolant[2]. En mettant l'appareil en communication avec le corps dont on veut évaluer le potentiel, — par exemple avec l'un des

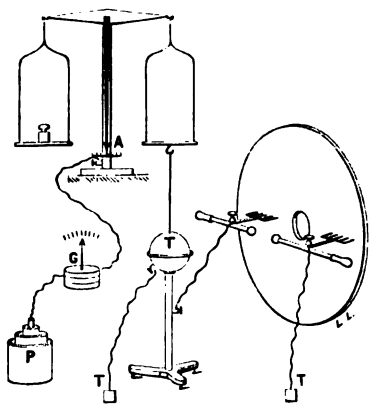


Fig. 802.

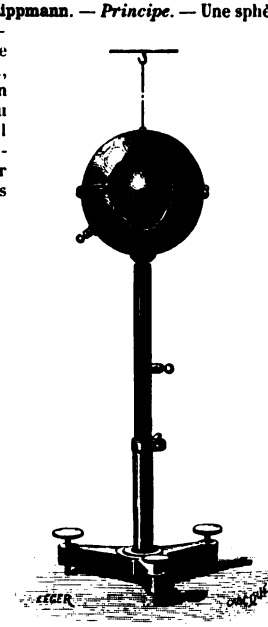


Fig. 803.

1. On lui a donné ce nom pour rappeler la mémoire de l'illustre physicien Volta.

2. *Il est facile de constater*, au début, qu'il y a contact entre les deux hémi-

rhéophores d'une machine électrique, — on constate immédiatement la rupture de l'équilibre préalablement établi. L'hémisphère supérieur est repoussé avec une force qu'il est possible d'évaluer en l'équilibrant par des poids convenables, disposés dans le petit plateau placé au-dessus de lui. Soit f cette force, il est aisé de l'évaluer par le calcul.

On a vu que la capacité d'une sphère est égale à son rayon R. On a donc pour la charge M : $M = R.V$.

La densité électrique — qui est uniforme par raison de symétrie — a donc pour valeur

$$\sigma = \frac{M}{S} = \frac{RV}{4\pi R^2} = \frac{V}{4\pi R};$$

Or la tension électrique, normale au conducteur, a pour valeur en chaque point $T = 2\pi\sigma^2$; donc

$$T = 2\pi \frac{V^2}{16\pi^2 R^2} = \frac{V^2}{8\pi R^2}.$$

La composante verticale, d'après le mode de liaison des organes de l'appareil, est seule efficace; elle a pour valeur, sur l'élément ΔS,

$$f = T\Delta S \cos\alpha;$$

Or $\Delta S \cos\alpha$ est la projection de ΔS sur le plan diamétral horizontal; donc $f = T\Delta S$. La résultante verticale relative à la demi-sphère complète est donc

$$F = T.S,$$

S étant la surface d'un grand cercle [1].

Donc $$F = \frac{V^2}{8\pi R^2} \cdot \pi R^2 = \frac{V^2}{8}.$$

On voit que ce résultat est indépendant du rayon R de la sphère : on peut donc la choisir assez petite pour qu'elle ne modifie pas sensiblement la charge du conducteur dont on veut déterminer le potentiel.

Remarques. — 1° Pour éviter l'influence des corps extérieurs, tout en augmentant la force f, M. Lippmann a entouré l'appareil d'une sphère concentrique (fig. 803), formant la seconde armature d'un condensateur.

2° Il est clair qu'on peut augmenter la sensibilité de la mesure en observant l'inclinaison du fléau de la balance par la méthode optique de Poggendorff (fig 805).

3° *Électromètre absolu de Thomson.* — Sir W. Thomson a imaginé un électromètre analogue, dans lequel la force mesurée est l'attraction qu'exerce l'armature indéfinie d'un condensateur plan sur un disque découpé dans la seconde armature.

889. **Électromètre à quadrants (de Thomson).** — L'électromètre ordinaire de Sir W. Thomson est le type des *électromètres relatifs* : il est connu sous le nom d'*électromètre à quadrants*. L'organe mobile est une aiguille plate C en aluminium (fig. 804), constituée essentiellement par deux quarts de cercle

sphères. Il suffit, comme l'indique le dispositif de la figure 802, d'introduire la sphère dans le circuit d'une pile P avec un galvanomètre G : s'il n'y a pas contact, le galvanomètre reste au zéro, parce que le courant de la pile ne passe pas.

1. C'est le même calcul que celui qui permet d'évaluer la pression exercée par l'atmosphère sur les hémisphères de Magdebourg).

opposés, et l'organe fixe consiste en quatre segments égaux A et A', B et B', reliés deux à deux, d'une sorte de boîte cylindrique plate. C'est dans l'intérieur de ces segments ou *quadrants* que se meut l'aiguille d'aluminium.

On démontre que la déviation α de l'aiguille est donnée par la formule générale

$$\alpha = K(V - V')\left(V_a - \frac{V + V'}{2}\right),$$

K étant une constante de l'instrument, V_a le potentiel de l'aiguille, V et V' ceux des deux paires de quadrants.

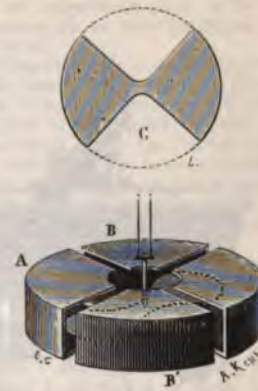


Fig. 804.

Remarque. — Plusieurs électromètres ont été construits sur le même plan que l'électromètre de Thomson, entre autres l'électromètre Branly et l'électromètre Mascart. Nous décrirons le premier comme type des électromètres à quadrants simplifiés.

Cas particuliers. — 1° En reliant les deux paires de quadrants aux pôles d'une *pile de charge de m* éléments, dont le milieu est au sol, on a

$$V = -V',$$

d'où

$$[2] \qquad \alpha = 2KVV_a.$$

2° En mettant l'une des paires de quadrants en relation avec l'aiguille, on a

$$V = V_a, \qquad \text{d'où} \qquad \alpha = \frac{K}{2}(V' - V_a)^2. \qquad [3]$$

d'où il suit que la déviation a toujours lieu dans le même sens, quel que soit le signe de l'électricité, qui charge à la fois l'aiguille et l'une des paires de quadrants ; c'est la méthode dite *homostatique*.

Les divers montages de l'appareil sont employés suivant les cas.

890. **Électromètre de M. E. Branly.** — *Description.* — L'aiguille est une large plaque en aluminium *a* (fig. 805), en forme de 8 ; elle se meut horizontalement au-dessus de quatre secteurs plans en laiton, isolés les uns des autres et formant les quadrants d'un même *cercle* ; ces secteurs plans jouent le même rôle que les quadrants creux de Thomson et, comme ceux-ci, ils sont reliés deux à deux en diagonale. Le centre de l'aiguille et celui du cercle sont sur une même verticale. La plaque mobile est soutenue par un fil métallique fin qui sert d'axe de suspension ; il se prolonge au-dessous de la plaque par une tige verticale à laquelle est fixé un miroir au moyen duquel on évalue l'angle de rotation de l'aiguille par la méthode de Poggendorff.

L'appareil est renfermé dans une cage carrée en glaces, surmontée d'un tube de verre sur lequel s'adapte une pince qui tient le fil de torsion. Un mouvement lent de cette pince permet d'abaisser ou d'élever légèrement la plaque mobile et, comme dans la balance de Coulomb, la pince peut être entraînée par le mouvement d'un tambour.

Usage. — Soit à mesurer avec l'électromètre la différence de potentiels que présentent les deux pôles d'une pile ou bien deux points quelconques D et D' d'un conducteur traversé par un courant.

On commence par donner à la plaque mobile un potentiel auxiliaire constant V_a, *en la reliant par le fil métallique* de suspension et par la pince au pôle posi-

tif à d'une pile dont le pôle négatif communique en T avec le sol[1]. On relie

Fig. 805.

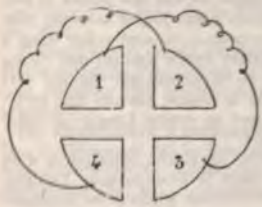


Fig. 806.

ensuite le point D par un long fil au système des secteurs 1 et 3 qui prennent le potentiel de D et l'on relie de même l'autre point au système des secteurs 2 et 4 qui prennent le même potentiel que D' (fig. 806). La plaque mobile, chargée positivement, est alors attirée par l'un des couples de secteurs et repoussée par l'autre. Pour un certain angle d'écart, il y a équilibre entre la force de torsion du fil et l'action exercée sur la

1. M. Branly emploie comme pile de charge une pile à eau pure, formée ordinairement de 100 éléments zinc-cuivre, de très petites dimensions, associés en série, et fixés sur un support isolant de résine ou de caoutchouc durci.

plaque par les secteurs fixes. On n'a plus qu'à porter la valeur de α dans la formule [1] (889).

Remarques. — 1° Avant de procéder aux expériences, il est indispensable de régler d'une façon précise la position d'équilibre de l'aiguille. Pour cela, on la tourne légèrement à l'aide du tambour qui supporte la pince et le fil métallique, jusqu'à ce qu'elle ait pris une position qui ne varie pas quand on fait communiquer les quatre secteurs avec le sol.

2° Dans certaines mesures, par exemple lorsqu'il s'agit de déterminer la capacité d'un conducteur, il est préférable de donner aux secteurs un potentiel fixe. Les secteurs 1 et 3 sont alors mis en communication avec le pôle positif d'une pile à eau, les secteurs 2 et 4 avec le pôle négatif; le milieu de cette pile est relié au sol. C'est alors le conducteur à étudier que l'on fait communiquer avec la plaque mobile. Ce montage correspond à la formule [2] (889).

3° On modifie à volonté la sensibilité de cet électromètre en élevant ou en abaissant l'aiguille à l'aide de la pince qui soutient le fil et en variant le nombre des éléments de charge. D'après M. Branly, on peut apprécier aisément, et avec sûreté, des différences de potentiel *inférieures à* $\frac{1}{100}$ *de Daniell.*

4° Cet instrument, employé surtout à effectuer des mesures comparatives, conserve rigoureusement la même sensibilité pendant un intervalle de temps assez long pour qu'on puisse exécuter une série de mesures.

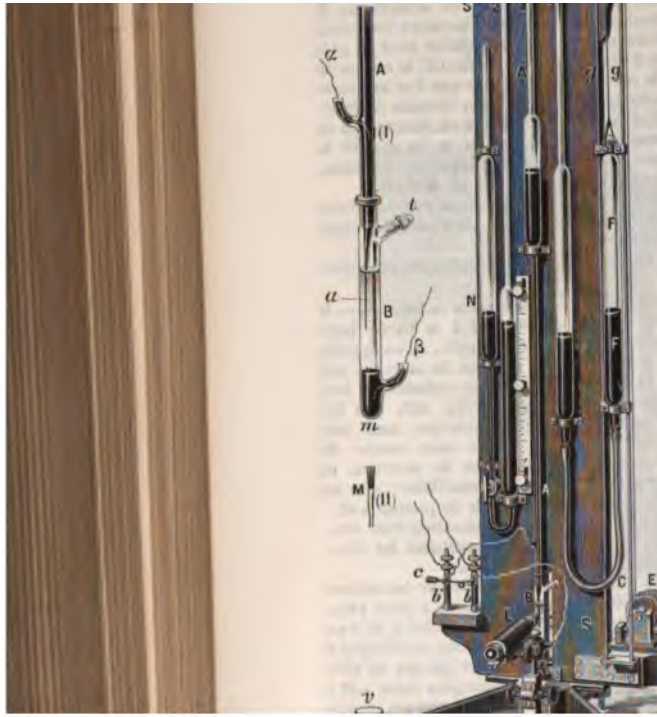
5° On peut aussi l'employer comme électroscope dans les *méthodes de réduction à zéro.*

891. **Électromètre capillaire de M. Lippmann.** — *Description sommaire.* — Il se compose essentiellement d'un tube vertical A, terminé à sa partie inférieure par une portion effilée d'un diamètre intérieur très petit, qu'on appelle la *pointe capillaire* (fig. 807). Le tube A contient une colonne de mercure qui pénètre par son poids dans la pointe et forme une colonne cylindrique très capillaire *a*, terminée par un ménisque hémisphérique M (fig. 807, I et II). Cette pointe plonge dans de l'acide sulfurique étendu, contenu dans une éprouvette cylindrique B au fond de laquelle B se trouve une couche de mercure *m* : l'eau acidulée est d'une part en contact avec le mercure, et remplit, d'autre part, la partie inférieure de la pointe capillaire; elle en mouille les parois, et elle baigne le ménisque M. Deux fils de platine α et β servent à mettre les masses de mercure A et B en communication avec deux bornes électriques isolées *b* et *b'* (fig. 807 et 808), qui constituent les deux *pôles* de l'électromètre.

Principe. — Les électromètres décrits plus haut sont fondés sur les actions à distance que régit la loi de Coulomb. L'électromètre capillaire a pour principe un phénomène de contact. On observe que, si l'on met les pôles α et β en communication métallique l'un avec l'autre, au moyen du pont métallique C (fig. 808), le ménisque M s'arrête en une position d'équilibre qui est le zéro de l'appareil. Vient-on maintenant, en ouvrant le pont, à intercaler entre α et β une différence de potentiel *e*, on observe que le ménisque se déplace immédiatement et prend une nouvelle position d'équilibre : or *le déplacement du ménisque dépend de la différence de potentiel employée et il peut, par suite, lui servir de mesure.*

On observe d'ailleurs les mouvements du ménisque non à l'œil nu, mais à travers un microscope horizontal L (fig. 807), braqué à poste fixe sur la pointe capillaire.

Opération et description complète. (*Modèle de M. A. Berget.*) — Au lieu de mesurer cette grandeur par le déplacement même du ménisque, on peut opérer d'une manière différente. Au moyen d'une *pression compensatrice*, obtenue (fig. 807) par le déplacement du réservoir F, le mercure, en s'élevant dans la colonne S, comprime l'air qui surmonte la colonne de mercure A et ramène *le ménisque jusqu'à son niveau* primitif; à ce moment on lit la valeur de la


α
A
(I)
t
α
B
β
m
M
(II)
c
b
L
N
A
A
g
F
F
C
E
S
v

large du tube et l'acide étendu le suit. Cet ingénieux dispositif évite également la formation de cristaux dans les régions utiles de la pointe et permet de faire varier aisément la pression.

Sensibilité de l'instrument. — L'électromètre capillaire permet d'apprécier le *dix-millième* environ de la force électromotrice d'un élément Daniell. De plus, ses indications sont instantanées : la colonne de mercure prend immédiatement et sans oscillations la position d'équilibre qui lui convient[1]. Par contre, il ne peut servir directement à mesurer des forces électromotrices supérieures à un Daniell; et il faut ne l'employer que dans un sens déterminé, c'est-à-dire mettre le pôle β en communication avec le pôle négatif de l'élément à mesurer. C'est là un bien léger inconvénient, car l'électromètre Lippmann est employé surtout comme *appareil de zéro*, c'est-à-dire pour constater l'égalité de deux potentiels.

Remarque. — Bien que la masse du mercure A soit en contact avec de l'acide sulfurique étendu, elle se comporte comme si elle en était électriquement isolée. Ainsi, quand, après avoir mis les pôles α et β en communication avec les pôles d'une pile, on supprime les communications, le potentiel atteint par A ne varie pas, non plus que le déplacement du mercure. Pour la même raison, l'électromètre capillaire est sensible à l'approche d'un bâton de résine frotté, et la colonne de mercure suit à distance tous les mouvements du corps électrisé.

Fig. 808.

1. La colonne de mercure obéit si rapidement aux changements de la force électromotrice que, si l'on intercale l'électromètre dans un circuit téléphonique, la colonne vibre comme le ferait la plaque d'un téléphone; et, comme ces vibrations se communiquent par réaction au support de l'appareil, si l'on applique l'oreille contre ce support, on entend alors les sons musicaux *ou la parole* articulée comme dans un récepteur téléphonique.

Théorie. — Il faut considérer les actions qui ont pour siège le ménisque M, où le mercure est en contact avec l'eau acidulée (fig. 807, II). Lorsqu'on intercale entre α et β une force électromotrice, telle que celle d'un élément Daniell, le ménisque M se polarise, c'est-à-dire qu'il y naît une force électromotrice capable de faire équilibre à celle de l'élément et d'empêcher le passage du courant[1]. (Il faut seulement que la force électromotrice ne dépasse pas beaucoup un Daniell, autrement elle n'est plus équilibrée : le courant passe et l'eau acidulée est décomposée.) La force électromotrice antagoniste ainsi développée est précisément égale à la force électromotrice e, à laquelle elle fait équilibre; on l'appelle *force électromotrice de polarisation*. D'autre part, le ménisque M est le siège de forces capillaires, qui ont pour effet de soutenir la colonne A, laquelle, par suite de son poids, tend à sortir par la pointe capillaire. On démontre que la résultante de ces forces équivaut à une pression h provenant de la *tension superficielle*, et qui aurait pour valeur

$$[1] \qquad h = \frac{2A}{\rho},$$

ρ étant le rayon du ménisque hémisphérique M, et A étant la *constante capillaire*, laquelle dépend de l'état de la surface mercurielle. Lorsque celle-ci se polarise, A varie, et, ainsi que l'a démontré M. Lippmann, A *est une fonction continue de e*. Il s'ensuit, d'après la formule [1], que *h est également fonction de e*. Lorsqu'on ramène le ménisque à occuper toujours la même position dans la pointe, on ramène le rayon ρ du ménisque à avoir toujours la même valeur; il s'ensuit, d'après la formule [1], que la valeur de h doit varier comme celle de A, c'est-à-dire que *la pression à exercer sur le mercure est fonction de la force électromotrice e*. C'est pour cette raison que les pressions compensatrices correspondent, comme on l'a dit plus haut, aux forces électromotrices qu'on intercale entre α et β, et que l'on se propose de mesurer.

1. Nous étudierons plus loin ce phénomène, appelé *polarisation des électrodes*.

LIVRE XI

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

CHAPITRE PREMIER

PILE VOLTAÏQUE.

HISTORIQUE ET GÉNÉRALITÉS.

892. **Piles voltaïques.** — On donne le nom de *piles voltaïques* à des sources d'énergie électrique alimentées par des réactions chimiques.

1° *Pile de Volta* ou *pile à colonnes.* — Le premier appareil de ce genre fut imaginé par Volta en 1800. Il se composait d'une série de doubles disques en *cuivre* et *zinc* soudés, *empilés* les uns sur les autres, tout en étant séparés les uns des autres par des rondelles de drap imbibées d'eau acidulée; la *pile* était maintenue entre trois colonnes de verre (fig. 809) : de là son nom.

2° *Modifications de la pile de Volta.* — La pile de Volta a reçu dès l'origine divers perfectionnements destinés à en rendre la manipulation plus commode et à empêcher l'acide d'être exprimé des rondelles sous l'action du poids des disques. Citons la *pile à auges* de Cruikshank, qui n'est au fond que la pile de Volta couchée horizontalement, et la *pile de Wollaston* (fig. 812), dans laquelle les couples sont placés dans une série de vases indépendants.

3° *Étude expérimentale. — La pile est une source d'électricité : Charge des condensateurs.* — Considérons une pile à vases indépendants (fig. 811). Il est facile de montrer tout d'abord qu'un tel système est une *source d'électricité.* En mettant en effet les armatures A et B d'un électromètre condensateur en communication respective avec les cuivres extrêmes P et P′ (*pôles de la pile*), on constate que celui-ci se charge, car les feuilles d'or divergent dès *qu'on enlève le plateau* B. Si M est la charge prise par A, C la

capacité du condensateur, la différence de potentiel V qui existe entre P et P′ a évidemment pour valeur

$$V = \frac{M}{C}.$$

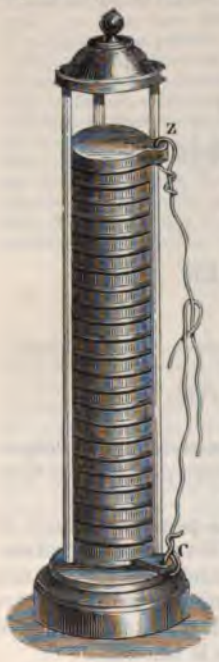


Fig. 809.

4° *Force électromotrice* et *courant électrique*. — Cette expérience montre bien que l'appareil appelé *pile* est le siège d'une cause capable de séparer les fluides électriques, de les déplacer : c'est ce qu'on appelle une *force électromotrice*.

Si on supprime l'isolant entre A et B, le circuit fermé, constitué par le fil qui réunit les pôles, par le liquide des piles et par les fils de jonction des zincs et des cuivres, devient *en tout point* le siège de propriétés nouvelles : déviation d'une aiguille aimantée voisine, échauffement du circuit, décomposition de certains composés dissous ou fondus intercalés dans le circuit, etc. On dit alors par abréviation que le circuit est parcouru par un *courant électrique*. Ces effets peuvent évidemment être considérés comme dus à un mouvement d'électricité s'effectuant à travers les conducteurs, et l'on peut mesurer *l'intensité* de ce courant par la *quantité d'électricité qui traverse une section quelconque du circuit pendant l'unité de temps*.

893. Historique de la pile. — *Expériences de Galvani*. — La découverte de la pile a eu pour origine une expérience célèbre de Galvani, que l'on peut répéter aisément comme il suit. On écorche une grenouille vivante, on la coupe

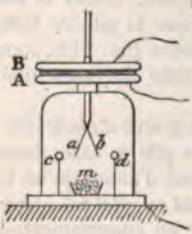


Fig. 810.

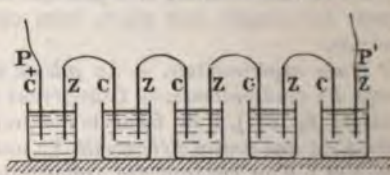


Fig. 811.

au-dessous des membres antérieurs (fig. 815); puis l'on met à nu les nerfs lombaires, qu'on aperçoit des deux côtés de la colonne vertébrale sous la

forme de filets blancs. On prend alors un arc métallique formé de deux métaux, zinc et cuivre, et, introduisant l'une des branches entre les nerfs et

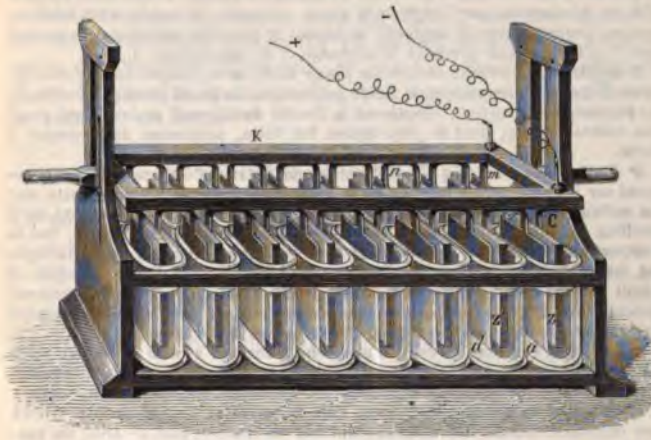


Fig. 812.

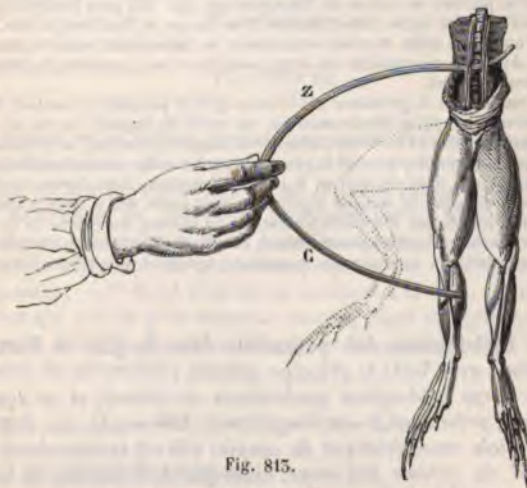


Fig. 813.

la colonne vertébrale, on fait toucher l'autre aux muscles de l'une des cuisses ou des jambes. A chaque contact, les muscles se replient et s'agitent, comme si cette moitié de *grenouille* revenait à la vie.

Galvani, qui dès 1780 avait produit avec l'électricité des machines électriques des commotions analogues sur les grenouilles mortes, attribua le phénomène à l'existence d'une électricité inhérente à l'animal. Il admit : 1° que cette électricité se développait par l'effet de la vie et chargeait les nerfs et les muscles comme des armatures de bouteille de Leyde ; 2° que l'arc métallique ne servait que d'excitateur pour produire la décharge et la contraction.

Il appela cette nouvelle électricité *fluide vital* ; on la désigna encore sous les noms d'*électricité animale* et de *fluide galvanique*. Un grand nombre de savants, les physiologistes surtout, adoptèrent la théorie de Galvani ; mais elle eut aussi des contradicteurs, dont le plus ardent fut Volta, professeur de physique à Pavie.

2° *Expériences de Volta.* — L'attention de Galvani s'était portée exclusivement sur les nerfs et les muscles de la grenouille ; celle de Volta se porta *sur les métaux qui servent à établir la communication*. C'est à ces métaux qu'il attribua le rôle principal dans le phénomène. Il se fondait sur ce fait, que la contraction musculaire est beaucoup plus énergique lorsque l'arc métallique est formé de deux métaux hétérogènes que lorsqu'il est d'un seul métal. Il admit : 1° que c'était par l'effet même de leur contact qu'il y avait dégagement d'électricité ; 2° que les organes de l'animal ne jouaient que le rôle secondaire de conducteur, et, en même temps, d'électroscope très sensible.

A l'aide de l'électroscope condensateur (qu'il inventa à cette occasion), Volta fit de nombreuses expériences pour démontrer le développement de l'électricité par le contact des métaux ; les suivantes sont fondamentales.

1° On prend un système de disques, l'un de cuivre et l'autre de zinc, fixés à des manches isolants. Les disques étant mis en contact, puis séparés, on constate qu'ils sont chargés, le zinc positivement et le cuivre négativement.

2° En tenant à la main l'extrémité cuivre d'une lame zinc-cuivre, et en touchant le plateau en cuivre de l'électroscope (fig. 766) avec l'extrémité zinc, on n'observe aucun signe d'électrisation. Il se charge, si l'on tient le zinc.

3° Si l'on répète cette dernière expérience en interposant entre le plateau et la lame de zinc une rondelle de drap mouillée d'eau acidulée, le plateau se charge *positivement*.

Volta conclut de la premiere expérience qu'il se produit au *contact* du zinc et du cuivre une *force électromotrice*, en vertu de laquelle le zinc se charge d'électricité positive et le cuivre d'électricité négative. Pour lui, la seconde expérience était une confirmation de la première : la lame zinc se trouvant en contact, à ses deux bouts, avec du cuivre, il devait se produire deux forces électromotrices opposées dont la somme algébrique était *nulle*. Enfin, dans la troisième expérience, il nait une force électromotrice au contact du cuivre et du zinc : ce dernier métal s'électrise positivement, et la rondelle acidulée, n'agissant que comme conducteur, au moins en apparence, transmet au plateau l'électricité du zinc.

894. Distribution des potentiels dans la pile de Volta. — Admettons avec Volta le principe suivant :

Deux corps hétérogènes quelconques en contact, et en équilibre électrique, présentent, à une température déterminée, une différence de potentiels caractéristique du couple ; elle est indépendante de la forme et du volume des corps, ainsi que de l'étendue du contact et du potentiel initial auquel peut être maintenu l'un des corps du couple.

On représente ordinairement par le symbole M|N la variation

de potentiel que l'on rencontre en allant de M vers N, les deux corps M et N étant en contact.

Désignons par C_1, C_2,..., etc., Z_1, Z_2,..., etc., les cuivres et les zincs successifs rencontrés en suivant de gauche à droite la suite des éléments d'une pile, et par L le liquide interposé. Si V est le potentiel du cuivre C_1, celui du cuivre C_2 sera, d'après le principe de Volta,

$$V + C_1 \mid L + L \mid Z_1 + Z_1 \mid C_2.$$

Le potentiel en C_3 sera de même

$$[1] \quad V + \underbrace{C_1 \mid L + L \mid Z_1 + Z_1 \mid C_2} + \underbrace{C_2 \mid L + L \mid Z_2 + Z_2 \mid C_3}.$$

Or, en vertu de la seconde partie du principe énoncé ci-dessus, il est clair que les sommes soulignées sont égales. Si e est leur valeur commune, le potentiel V′ sur C_{n+1} aura pour valeur

$$V + ne.$$

On a donc

$$V' = V + ne,$$

d'où

$$V' - V = ne.$$

Cette valeur est la même quelles que soient la forme, la position et les dimensions des électrodes et des conducteurs de jonction. La nature des électrodes et des liquides influe seule.

La différence de potentiels présentée par les pôles d'une pile de n éléments identiques et en équilibre électrique est donc égale à n fois la différence de potentiels propre à un seul élément.

Remarques. — 1° Il est clair qu'en mettant à la terre le cuivre de jonction qui suit le K*ième* élément, ceux-ci étant comptés en allant de gauche à droite, les deux pôles C_1 et C_{n+1} prendraient respectivement les potentiels

$$-Ke \quad \text{et} \quad -(n-K)e,$$

n étant le nombre des éléments.

Pour $K = \frac{n}{2}$, les potentiels des pôles seraient équidistants du potentiel du sol, c'est-à-dire égaux et de signe contraire.

2° C'est en vertu de la force électromotrice ne que se charge le condensateur AB. L'énergie électrique $\frac{1}{2}M(V-V')$ ou $\frac{C(ne)^2}{2}$ emmagasinée par le condensateur a été empruntée aux *réactions chimiques* auxquelles la fermeture du circuit sur le condensateur, — ou sur lui-même s'il s'agit d'un courant, — donne lieu.

Si la chaîne ne renfermait que des solides inaltérables à température uniforme, le principe de la conservation de l'énergie montre, ce qui est confirmé par l'expérience, qu'il serait impossible de charger avec elle un condensateur.

3° Si les fils attachés aux pôles C_1 et C_{n+1} sont constitués par un même métal m, il faudra, en appelant V le potentiel de m à gauche, ajouter à $V + ne$ les différences $m|C_1$ et $C_3|m$, qui sont évidemment égales et de signes contraires, d'après le principe du contact. Donc la différence de potentiels est indépendante de la nature du métal m des extrémités ou pôles de la pile.

895. **Définitions fondamentales.** — *Pôles positif et négatif.* — On convient d'appeler *pôle positif* l'extrémité de la pile dont le potentiel est le plus élevé ; l'autre extrémité est le *pôle négatif*.

Il résulte de cette définition et des principes de l'électrostatique, que l'armature d'un condensateur, étant reliée au pôle positif, se charge d'électricité positive, l'autre armature reliée au pôle négatif se chargeant d'une quantité égale (principe de la conservation de l'électricité) d'électricité négative.

Force électromotrice et différence de potentiels. — Les charges positive et négative des pôles déterminent un champ qui tend à déplacer l'électricité positive dans la pile en sens inverse du sens où agit la force électromotrice de la pile. Il y a donc équilibre électrique dès que les charges polaires sont suffisantes pour contre-balancer l'action de cette force électromotrice. Celle-ci, en d'autres termes, est égale et de sens contraire à la force électromotrice due à la différence de potentiels présentée par les deux pôles : c'est ainsi que l'action du poids qui comprime un ressort est égale et de signe contraire à la réaction du ressort.

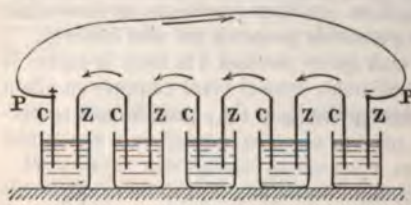


Fig. 814.

Sens du courant. — *En convenant* de faire porter le sens des déplacements sur l'électricité positive, on sait que le mouvement électrique a toujours lieu dans le sens des *potentiels décroissants* : le courant sera donc dirigé du pôle + au pôle — (fig. 814) extérieurement à la pile. Le pôle négatif est toujours en relation avec le métal (ou électrode) attaqué par le liquide : c'est le zinc dans les piles usuelles. Le courant a pour cause l'existence de la force électromotrice *ne*, fournie par les contacts de la chaîne des conducteurs qui constituent la pile, et il est alimenté par les réactions chimiques dont les éléments sont le siège.

Intensité du courant. — On mesure l'intensité des courants (ci-dessus définie, 892, 4°) au moyen d'une unité qui sera ultérieurement définie et qui a reçu le nom d'*ampère*.

CHAPITRE II

CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE. — LOIS DE POUILLET. FORMULE DE OHM.

896. **Définitions.** — *Conductibilité électrique.* — L'expérience a démontré que l'intensité d'un courant électrique varie lorsqu'on modifie le circuit fermé que parcourt ce courant. Étant donnée une pile supposée toujours *identique à elle-même*, l'intensité du courant qu'elle fournit, c'est-à-dire la quantité d'électricité qui circule, en une seconde, à travers une section du circuit, dépend de la substance, de la section et de la longueur de ce circuit. L'étude des relations qui existent entre l'intensité d'un courant et les éléments du circuit constitue le problème de la *conductibilité électrique*.

Ce problème a été traité par deux méthodes : 1° la méthode expérimentale, appliquée par Pouillet : elle a conduit aux lois expérimentales de Pouillet ; 2° la méthode analytique, méthode *à priori* appliquée par Ohm : elle a conduit aux lois de la conductibilité électrique, comprises dans la formule d'*Ohm*. Ces résultats sont d'ailleurs parfaitement conformes à ceux de la méthode expérimentale ; ils sont confirmés par les lois de Pouillet, et réciproquement.

897. **Loi des conducteurs équivalents.** — Si l'on relie les deux pôles d'*une pile* par un circuit métallique, dit circuit inter-

polaire, on constate, à l'aide d'un *rhéomètre*[1] quelconque, que le courant a une certaine intensité. Si l'on augmente la longueur du circuit, ou qu'on substitue un fil fin à un gros fil de la même substance, on constate que l'intensité I du courant est notablement diminuée, et devient $I' < I$. L'affaiblissement est incomparablement plus fort quand on substitue à une petite portion du circuit métallique une colonne d'un liquide conducteur.

Avant Pouillet, Davy était le premier qui eût comparé les différents conducteurs au point de vue de la variation qu'ils font subir à l'intensité d'un courant, quand on les introduit dans le circuit interpolaire. Il était arrivé à la loi suivante, dite *loi des conducteurs équivalents* :

La variation du courant produite par deux conducteurs de même substance, introduits successivement dans un même circuit, est la même lorsque leurs longueurs et leurs sections sont dans le même rapport, c'est-à-dire lorsqu'on a

$$[1] \qquad \frac{l}{l'} = \frac{s}{s'}, \quad \text{ou} \quad \frac{l}{s} = \frac{l'}{s'}.$$

On dit alors que ces deux fils sont *équivalents*, c'est-à-dire qu'ils *s'équivalent* au point de vue de leur effet sur le courant.

898. **Conséquences de la loi des conducteurs équivalents.** — 1° *Longueur réduite.* — Si, par exemple, le deuxième fil introduit a une section égale à l'unité de surface, soit 1 mm², on déduit de la formule [1] qu'il faut lui donner une longueur $\lambda = \frac{l}{s}$ pour qu'il soit *équivalent* au premier fil.

λ est ce qu'on appelle la *longueur réduite* du fil (l, s).

Étant donnée une série de fils (l, s), (l', s'), (l'', s''),... de substances différentes, on aura immédiatement leurs *longueurs réduites* en posant $\lambda = \frac{l}{s}$, $\lambda' = \frac{l'}{s'}$,....

λ, λ', λ''... représentent les longueurs des fils, de section 1, *équivalents* aux fils considérés et de même substance que ces fils.

2° *Résistances.* — Ces *longueurs réduites* ne sont pas comparables entre elles, parce qu'elles sont de substances différentes. On a cherché à les rendre comparables en les ramenant toutes à des longueurs d'une même substance, prise pour terme de comparaison.

1. *Rhéomètre*, signifie instrument mesureur de l'intensité des courants (ῥεῖν, couler, et μέτρον, mesure).

Soit un fil (l, s), de substance quelconque, par exemple en cuivre; cherchons la longueur d'une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section qui lui soit équivalente. Au lieu de trouver $\frac{l}{s}$ pour la longueur de la colonne de mercure équivalente, nous trouverons $\frac{l}{cs}$, c étant un certain coefficient. En appelant r cette longueur de mercure, nous aurons $r = \frac{l}{cs}$. Pour un autre fil (l', s') de la *même substance*, nous trouverions $r' = \frac{l'}{cs}$, et le coefficient c serait le même, car il ne dépend que de la substance. Pour un fil $(l_1\ s_1)$ d'une autre substance, par exemple de maillechort, nous trouverions $r_1 = \frac{l_1}{c_1 s_1}$. Les coefficients $r, r', r_1 \ldots$ s'appellent *longueurs réduites en mercure* ou, plus fréquemment, *résistances* des fils (l, s), (l', s'), $(l_1\ s_1)$....

3° *Coefficients de conductibilité.* — Quand aux constantes $c, c_1 \ldots$, on les appelle *coefficients de conductibilité* du cuivre, du maillechort, etc. Il est aisé de voir la signification physique de ces coefficients. Si l'on cherchait la *longueur réduite en mercure* d'un fil de cuivre de section 1 et de longueur 1, on trouverait $\rho = \frac{1}{c}$.

Par conséquent, la longueur ρ de la colonne de mercure équivalente varie en raison inverse de ce coefficient c; ce coefficient est donc *caractéristique* de la conductibilité de la substance : de là son nom.

4° *Lois de la résistance.* — La formule ci-dessus,

$$r = \frac{l}{cs},$$

comprend *les lois de la résistance*. On voit que la *longueur réduite en mercure* ou la *résistance* d'un conducteur métallique est :

1° Proportionnelle à la longueur;
2° Inversement proportionnelle à la section;
3° Inversement proportionnelle au coefficient de conductibilité.

899. **Unités de résistance électrique : unité absolue et unité pratique** (*ohm*). — On a rapporté la résistance électrique aux unités fondamentales : centimètre-gramme-seconde. L'unité de résistance ainsi définie est appelée unité absolue ou unité

C. G. S. Comme cette unité est extrêmement petite, on emploie dans la pratique une unité secondaire, qui vaut *cent millions d'unités* absolues : on l'appelle *ohm*[1]. On évalue toutes les résistances en *ohms*, comme on évalue les capacités en *farads*, les potentiels en *volts* et les quantités d'électricité en *coulombs*.

L'ohm a été réalisé matériellement, comme le mètre, et l'on a construit un *ohm-étalon*, comme on a fait un *mètre-étalon*.

L'ohm-étalon légal est exactement égal à la résistance à 0° d'une colonne de mercure ayant une section de 1 millimètre carré et une longueur de 106 centimètres[2].

900. **Expériences de Pouillet. — Loi des courants thermo-électriques.** — Pouillet commença par étudier le cas simple des courants thermo-électriques. Nous avons déjà dit qu'on appelle *élément thermo-électrique* un système électromoteur formé, par exemple, de deux tiges de cuivre soudées aux extrémités d'une tige de bismuth (fig. 815). Quand on maintient l'une des soudures à 100° et l'autre à 0°, on obtient un courant.

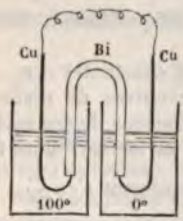


Fig 815.

Pouillet prit donc un de ces éléments, et en réunit les deux pôles successivement par une série de fils conducteurs dont il avait déterminé d'avance les *longueurs réduites en mercure*, r, r', r''.... A l'aide d'un rhéomètre, il mesurait l'intensité que prend le courant dans chaque cas : il avait ainsi i, i', i''.... En comparant entre elles ces deux séries de valeurs, il arriva à la loi suivante :

Loi. — *Le produit de la résistance du fil interpolaire par l'intensité correspondante du courant est un nombre constant pour un même élément*, c'est-à-dire

$$ir = i'r' = i''r'' = \text{constante}.$$

Soit E ce produit constant, caractéristique de l'élément ; on a

$$[1] \qquad ir = E, \qquad \text{d'où} \qquad i = \frac{E}{r}.$$

1. Du nom du physicien allemand Ohm.

2. La résistance d'un ohm est à peu près celle de 100 m de fil de fer télégraphique de 4 mm de diamètre, ou encore de 48 m de fil de cuivre de 1 mm de diamètre.

Cette formule prouve que l'*intensité d'un courant thermo-électrique* est inversement proportionnelle à la *longueur réduite* du conducteur interpolaire. Plus cette *longueur réduite* est grande, plus l'intensité est faible. Le conducteur interpolaire agit donc comme un obstacle au passage du courant. De là le nom de *résistance* qu'on donne plus habituellement à la *longueur réduite en mercure*.

901. **Loi des courants hydro-électriques.** — Pouillet répéta les mêmes expériences de mesure avec un élément hydro-électrique convenable. Il réunissait successivement les deux pôles avec des conducteurs de résistances variables r, r'... déterminées d'avance. Il introduisait dans chacun des circuits un rhéomètre dont la résistance était *négligeable* par rapport à celle du circuit total; il avait ainsi i, i', i''.... En comparant ces deux séries de valeurs, il trouva cette deuxième loi :

Loi. — *Le produit de l'intensité du courant par la somme* $r + R$ est un *nombre constant pour un même élément de pile supposé invariable* (r étant la résistance du circuit interpolaire et R une constante dépendant de l'élément) :

$$i(r + R) = i'(r' + R) = i''(r'' + R) = \text{constante}.$$

Soit E la valeur de ce produit, on a

$$i(R + r) = E, \qquad \text{d'où} \qquad i = \frac{E}{R + r}.$$

902. **Constantes d'un élément voltaïque.** — On voit que l'intensité du courant fourni par un élément voltaïque quelconque est *déterminée* par les deux coefficients constants R et E. C'est ce qu'on appelle les *constantes* de l'élément.

Résistance intérieure. — La constante R, variable avec la forme, lse dimensions et la position des *électrodes*, joue dans la formule le même rôle que r. On peut donc l'assimiler à une résistance propre à l'élément de pile. On l'appelle, en effet, *résistance intérieure* de l'élément.

L'expérience prouve d'ailleurs que cette assimilation est bien fondée, car, en modifiant les surfaces polaires d'un élément de manière à diminuer ou à augmenter sa résistance, on diminue ou on augmente R, d'après la formule $r = \frac{l}{cs}$.

Force électromotrice. — La constante E, caractéristique de la nature des corps qui constituent l'élément, a été appelée force

électromotrice. On voit que, si la somme des deux résistances $(R + r)$ devenait égale à l'unité de résistance, l'intensité nouvelle serait précisément égale à E.

Par conséquent, la force électromotrice d'un élément est mesurée par le même nombre que *l'intensité du courant que fournirait cet élément si la somme des résistances (intérieure et extérieure) était égale à l'unité.*

Remarque. — La simplicité des expériences de Pouillet relatives aux couples thermo-électriques provenait précisément de ce que leur résistance intérieure, formée par les barreaux et les lames employées, était négligeable.

903. **Couplage des piles.** — Étant donnés un certain nombre d'éléments de pile, on peut les associer, ou, comme on dit, les *coupler* de plusieurs manières.

Considérons, par exemple, le cas de six éléments voltaïques[1]. On peut former quatre combinaisons.

1° On peut réunir les éléments par leurs pôles de nom contraire, comme l'avait fait Volta, en une seule série longitudinale (fig. 816), dont C représente le pôle positif et Z le pôle négatif : c'est le couplage *en série* ou *en tension.*

2° On peut associer les six éléments comme on associe les jarres d'une batterie électrique, c'est-à-dire en réunissant d'une part tous les pôles positifs et d'autre part tous les pôles négatifs (fig. 817). On obtient alors une nouvelle forme de pile, dont le pôle positif est en C, c'est-à-dire en un point quelconque de la ligne de jonction des six pôles positifs, et dont le pôle négatif est en Z, c'est-à-dire en un point quelconque de la ligne de jonction des six pôles négatifs. C'est le couplage *en batterie*, ou *en surface*, ou *en quantité.*

3° et 4° On peut former d'abord soit deux séries parallèles de trois couples chacune (fig. 818), soit trois séries parallèles de deux couples chacune (fig. 819), puis réunir en un même point les électrodes positives des deux séries, et leurs électrodes négatives en un même point Z. On a ainsi deux nouvelles *piles*, dont les pôles sont C et Z ; c'est le couplage *mixte*, en série et en tension.

Avec douze éléments, on pourrait réaliser six combinaisons différentes, et ainsi de suite à mesure qu'on prend un plus grand nombre d'éléments. Mais sous ces combinaisons variées il n'y a en réalité que trois modes distincts de *couplage.*

1. Nous représenterons le pôle positif de chacun d'eux par un petit cercle blanc haché, et le pôle négatif par une circonférence noire de plus grand diamètre (fig. 816-818).

904. Constantes d'une pile : Expériences de Pouillet. — A chaque groupement correspond une *force électromotrice totale* et une *résistance intérieure totale* qui déterminent l'intensité du courant, résultant étant donné le circuit interpolaire. Pouillet a déterminé dans chaque cas la relation qui existe entre ces *constantes* de la pile et les *constantes* des éléments.

Fig. 816.

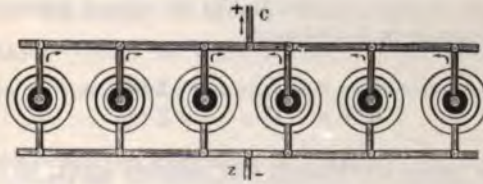


Fig. 817.

Fig. 818.

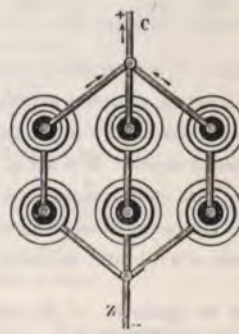


Fig. 819.

Il prit pour cela six éléments, autant que possible identiques. Il détermina pour chacun d'eux les constantes. En général, ces constantes n'étaient pas absolument égales, mais elles différaient peu les unes des autres. On avait e, e', e'',... et ρ, ρ', ρ'',...

Il forma une pile avec ces six éléments : 1° d'abord en les couplant en série ; 2° puis en les couplant en batterie ; 3° en les couplant à la fois des deux manières.

Il retrouva dans tous les cas la loi générale

$$I(R + r) = I'(R + r').$$

Par conséquent, dans le cas d'une pile montée d'une manière quelconque, comme dans le cas d'un seul élément, l'intensité du courant est exprimée par la formule

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

E et R sont les *constantes* de la pile. En les déterminant dans chaque cas, il trouva qu'elles avaient des valeurs différentes suivant l'arrangement des éléments.

1° *Pile en série.* $E = e + e' + \ldots = \Sigma(e)$,
$R = \rho + \rho' + \ldots = \Sigma(\rho)$.

Dans le cas où les éléments sont supposés égaux, les formules deviennent

$$E = 6e, \qquad R = 6\rho \qquad \text{et} \qquad I = \frac{6e}{6\rho + r}.$$

Remarques. — 1° Si la résistance extérieure r est petite vis-à-vis de ρ, l'intensité du courant est sensiblement égale à $\frac{e}{\rho}$: elle est donc la même que si on utilisait seulement un élément de pile.

2° En faisant varier r de 0 à l'∞, I varie de $\frac{e}{\rho}$ à 0. Si, par exemple, une pile a une force électromotrice de 2 volts et une résistance intérieure égale à $\frac{1}{100}$ d'ohm, elle pourra donner toutes les intensités de courants compris entre 200 ampères et 0 : il suffit de choisir un circuit extérieur convenable.

2° *Pile en batterie.* — En supposant que les éléments soient identiques, Pouillet trouva

$$E = e \quad \text{et} \quad R = \frac{\rho}{6} \quad \text{et la formule} \quad I = \frac{6e}{\rho + 6r}.$$

3° *Pile mixte.* — En général, le nombre des éléments étant n, on peut en réunir p en batterie et réunir ces p batteries elles-mêmes en une série de q éléments multiples, de telle façon qu'on ait $pq = n$.

On trouve alors que $E = qe$ et $R = \frac{\rho}{p}$ et par conséquent

$$I = \frac{qE}{\frac{\rho}{p} + r}.$$

Par exemple, pour une série de trois batteries de deux éléments chacune, nous aurons

$$I = \frac{3e}{\frac{\rho}{2} + r}.$$

Remarque. — Tous ces résultats sont d'accord avec la loi des contacts de Volta et avec la formule $r = \frac{l}{cs}$.

905. **Comparaison des divers modes de couplage.** — Les lois de Pouillet et les formules qui les expriment permettent de déterminer quel est le mode de couplage le plus avantageux à employer, pour un nombre déterminé d'éléments, quand il s'agit de faire travailler la pile dans un circuit extérieur de résistance connue.

Pour n couples, de force électromotrice e et de résistance intérieure ρ, montés en série, l'intensité I est donnée par la formule

$$I = \frac{ne}{n\rho + r}.$$

Si les mêmes couples sont montés en batterie, on a

$$I = \frac{e}{\frac{\rho}{n} + r} = \frac{ne}{\rho + nr}.$$

Ces deux formules peuvent s'écrire sous la forme

$$I = \frac{ne}{(r + \rho) + (n - 1)\rho} \quad \text{et} \quad I' = \frac{ne}{(r + \rho) + (n - 1)\, r},$$

où les numérateurs sont égaux et où les dénominateurs ont une partie commune $r + \rho$. Par suite, si $r = \rho$, les deux dénominateurs sont égaux et l'on a $I = I'$; si r est $> \rho$, on a $I' < I$, et pour $r < \rho$ on trouve $I' > I$.

Il y a donc avantage à monter la pile en batterie lorsque la résistance extérieure est *faible*, et en série *dans le cas contraire*.

Règle générale. — L'effet maximum d'une pile est obtenu par un couplage tel, que la résistance extérieure soit égale à la résistance intérieure.

En effet, supposons le cas général de N éléments associés en k séries parallèles de n éléments chacune. D'après les lois de Pouillet, chaque série a une

force électromotrice ne et une résistance n_2, et pour k séries montées en batterie, la résistance étant k fois moindre, on a

$$[1] \qquad I = \frac{ne}{r + \frac{n_2}{k}} \qquad \text{ou} \qquad I = \frac{kne}{kr + n_2} = \frac{Ne}{kr + \frac{kn_2}{k}} = \frac{NE}{kr + \frac{N_2}{k}}.$$

La valeur de I sera évidemment maximum quand le dénominateur $kr + \frac{N_2}{k}$ sera minimum. Or ce dénominateur est la somme de deux termes dont le produit est constant :

$$kr \times \frac{N}{k} = Nr_2;$$

donc son minimum a lieu lorsque les deux termes de la somme sont égaux, c'est-à-dire lorsqu'on a

$$kr = \frac{N_2}{k}, \qquad \text{d'où} \qquad r = \frac{n_2}{k}.$$

Le maximum de I a donc lieu *lorsque la résistance intérieure de la pile est égale* à la *résistance totale du circuit extérieur.*

906. **Théorie** et **Formule d'Ohm.** — 1° *Principe du calcul* (fig. 820). — Avant Pouillet, — qui l'ignorait d'ailleurs, — le physicien allemand Ohm avait traité par le calcul le problème de la conductibilité électrique. Il avait simplement appliqué à la propagation de l'électricité dans un fil conducteur les calculs de Fourier sur la propagation de la chaleur par conductibilité. En partant des mêmes hypothèses, il fut conduit aux mêmes résultats, exprimés dans une même formule. Cette théorie a été précisée par Kirchhoff.

Fig. 820.

2° *Champ en un point.* — Soit un électromoteur (ou source d'électricité quelconque), maintenant les deux corps A et B aux potentiels constants V_a et V_b, et soit F le champ électrique, évidemment dirigé de A vers B, qui agit au point M du conducteur intercalaire ab. Si la quantité $+1$ d'électricité est déplacée de $MM' = \Delta l$, le travail produit a pour expression

$$\Delta W_1 = F \times \Delta l.$$

Or $\Delta W_1 = -\Delta V$ (ΔV représentant la différence des potentiels aux points M' et M) on a

$$-\Delta V = F \times \Delta l$$

et par suite

$$F = -\frac{\Delta V}{\Delta l},$$

Si l'on fait tendre vers zéro Δl qui est pris très petit, la limite du rapport $-\frac{\Delta V}{\Delta l}$, est le champ au point M du conducteur ab.

3° *Intensité du courant.* — En admettant :

1° Que la quantité d'électricité qui traverse la section du conducteur en M est proportionnelle à la valeur du champ en ce point;

2° Qu'elle est proportionnelle à la section s du conducteur supposé homogène et au temps, on a, pour exprimer ce flux d'électricité par seconde, la relation

$$q = -c.s.\left(\frac{\Delta V}{\Delta l}\right).$$

Or le système prend un régime permanent, c'est à-dire pour lequel il ne saurait y avoir accumulation d'électricité entre deux sections. Ce fait exige évidemment que q soit alors constant, et par suite que la force électromotrice en chaque point, c'est-à-dire $-\frac{\Delta V}{\Delta l}$, soit également constante. Le flux permanent q que l'on représente par I est, dans ces conditions, l'*intensité du courant.*

5° *Chute du potentiel.* — Dire que le rapport $\frac{\Delta V}{\Delta l}$ est le même dans toutes les régions du conducteur ab, c'est dire évidemment qu'il est indépendant de l, ou, en d'autres termes, que deux segments égaux Δl pris en des régions quelconques le long du conducteur présentent entre leurs sections extrêmes une même différence de potentiel ΔV.

Or, la variation de potentiel relative à la longueur totale $ab = l$ ayant pour valeur

$$V_a - V_b,$$

la diminution de potentiel par unité de longueur en allant de a vers b sera

$$\frac{V_a - V_b}{l},$$

de telle sorte que le potentiel de la section située à la distance x de a sera

$$V_x = V_a - \frac{V_a - V_b}{l}.x.$$

5° *Diagramme de la chute du potentiel.* — On peut encore écrire cette relation

$$\frac{V_a - V_x}{x} = \frac{V_a - V_b}{l}.$$

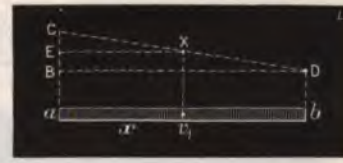


Fig. 821.

Or, en portant en a et b (fig. 821) des longueurs $V_a = aC$ et $V_b = bD$, traçant la ligne CD, puis BD, v_1 X, XE, on a, en considérant les deux triangles semblables XCE, DCB,

$$\frac{CE}{EX} = \frac{CB}{BD} \quad \text{ou} \quad \frac{aC - v_1X}{av_1} = \frac{aC - bD}{ab},$$

ou encore

$$\frac{V_a - v_1X}{x} = \frac{V_a - V_b}{l};$$

donc V_x est représentée par la perpendiculaire v_1X.

En d'autres termes, la ligne droite CD jouit de la propriété de représe

par les perpendiculaires abaissées de ses différents points sur le conducteur, les potentiels du conducteur au pied des perpendiculaires.

6° *Coefficient de conductibilité.* — Comme $\frac{\Delta V}{\Delta l}$ a la même valeur que $\frac{V_a - V_b}{l}$, on peut exprimer l'intensité I du courant d'électricité par la formule

$$= + cs \frac{V_a - V_b}{l}.$$

Le coefficient c, qui dépend de la substance, en mesure la *conductibilité spécifique*. Ordinairement on considère à tort la valeur inverse

$$\rho = \frac{1}{c},$$

qui a reçu le nom de *résistance spécifique*; on a alors

$$I = + \frac{s}{\rho l} (V_a - V_b).$$

que l'on peut écrire

$$[1] \qquad I = \frac{(V_a - V_b)}{\left(\frac{\rho l}{s}\right)}.$$

L'expression $\frac{\rho l}{s}$, que l'on désigne par une lettre unique R, est la *résistance électrique* du conducteur ab.

7° *Formule d'Ohm.* — En remarquant que

$$\frac{V_a - V_b}{l} = \frac{V_a - V_x}{x} = \frac{V_{x_1} - V_{x_2}}{x_2 - x_1},$$

on voit que I s'écrit

$$I = \frac{V_{x_1} - V_{x_2}}{\frac{\rho(x_2 - x_1)}{s}};$$

$\frac{\rho(x_2 - x_1)}{s}$ est la résistance de la portion $x_1 x_2$ seulement; donc la formule [1],

$$R \times I = V_a - V_b,$$

s'applique à une portion quelconque du conducteur.

C'est la raison de la fécondité de la loi d'Ohm. Sous la forme résultante vérifiée par Pouillet, elle serait beaucoup moins utile.

907. **Vérification expérimentale de la formule d'Ohm.** — Il est aisé de vérifier par une méthode d'équilibre que la distribution des potentiels est bien conforme à celle indiquée par la théorie précédente (fig. 822).

On relie la terre au pôle + d'une machine électrostatique, — dont l'autre pôle est également au sol, — à l'aide d'un conducteur F qui est une corde homogène mouillée; puis on déplace le long du fil deux contacts mm, maintenus à distance constante par une tige isolante N, et reliés respectivement à la boule et à la cage métallique qui environne l'électroscope et dont la moitié supérieure a été enlevée sur la figure : on constate que ce déplacement ne fait pas varier l'écart des feuilles d'or.

Avec les piles et un électromètre, l'électromètre capillaire par exemple, la vérification est beaucoup plus facile et absolument rigoureuse.

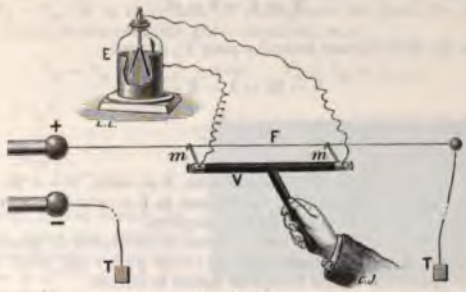


Fig. 822[1].

Il est facile de s'assurer, au moyen d'un électromètre Q (fig. 823), que la différence de potentiel qui existe entre les points A et B, A et M, etc., est proportionnelle aux résistances AB, AM, etc., aux longueurs AB, AM, etc., par exemple, si le fil est homogène et présente partout la même section.

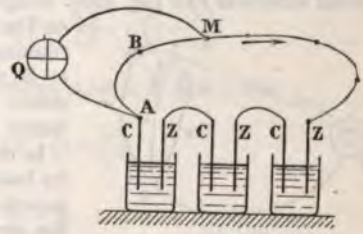


Fig. 823.

908. **Formule de Pouillet.** — On vient de voir que si e est la différence de potentiel entre deux points séparés par une résistance r, on a

$$e = rI,$$

I étant une constante en toute section du circuit. Cela posé, considérons le circuit fermé (fig. 824). Si V est le potentiel en M du pôle positif, la loi d'Ohm et la loi des contacts permet de calculer le potentiel V' au pôle négatif M de deux manières, soit en suivant le conducteur extérieur, soit en suivant la chaîne intérieure.

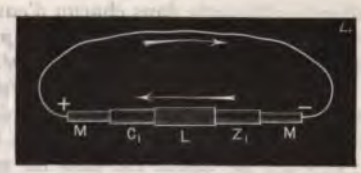


Fig. 824.

Si I est l'intensité du courant et R la résistance du circuit extérieur, on a

$$V' = V - RI.$$

Intérieurement, le potentiel diminue de $E = M\,|\,Z_1 + Z_1\,|\,L + L\,|\,C_1 + C_1\,|\,M$ du fait des contacts *lorsqu'on suit la chaîne* et augmente de rI du fait de la loi d'Ohm, *r étant la résistance de la chaîne*; donc, en remarquant que E est la grandeur

1. *Expériences du Cours de M. G. Lippmann.*

qui a reçu le nom de force électromotrice de la pile dans la *théorie du contact*, on a

$$[1] \qquad V' = V - E + rI.$$

En égalant les deux valeurs trouvées pour V', il vient

$$V - RI = V - E + rI$$

d'où la formule de Pouillet $\qquad I = \dfrac{E}{R + r}.$

Remarques. — 1° On exprime I en ampères, E en volts, $R + r$ en ohms; les unités sont tellement choisies que le quotient de E exprimé en volts par $R + r$ exprimé en ohms donne la valeur de I en ampères.

2° L'équation [1] montre qu'en circuit fermé la différence de potentiels $V - V'$ entre les pôles de la pile est égale à $E - rI$: donc plus r est petit, et moins la différence de potentiels baisse lorsqu'on ferme le circuit.

909. Application des formules d'Ohm : Problème de la dérivation. — Soit P une pile dont on réunit les deux pôles par un circuit extérieur PAB (fig. 825). Imaginons qu'on coupe le circuit en l'un de ses points, et que l'on réunisse les deux bouts séparés A et B au moyen de deux ou plusieurs fils métalliques de résistances r, r', r''.

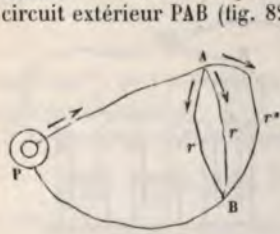


Fig. 825.

Le circuit (comprenant la pile et les bouts PA et PB) s'appelle *circuit principal* : soit R sa résistance. Les circuits ajoutés, de résistance r, r',..., s'appellent *dérivations*.

Le courant de la pile qui circule dans les divers circuits a une intensité différente dans chacun d'eux. Le courant considéré dans le circuit principal s'appelle *courant principal*; considéré dans les dérivations, il s'appelle *courant dérivé*.

Le problème général de la dérivation consiste à trouver les intensités du courant principal I, et des courants dérivés i, i', i'', connaissant la force électromotrice E et toutes les résistances R, r', r''.... Le calcul est plus ou moins long, suivant que les dérivations sont plus ou moins nombreuses.

Les cas d'une dérivation, de deux dérivations, de trois dérivations même, se résolvent aisément par l'application directe de la formule d'Ohm. En voici quelques exemples, qui trouveront leur application dans l'usage des instruments de mesure.

910. Problème du shunt. — 1. Entre les points A et B le conducteur est dé-

doublé suivant AaB et AbB; quel est rapport des intensités des courants qui se dérivent dans les deux fils?

En suivant l'un ou l'autre des deux fils, de A en B (fig. 826), le potentiel doit varier de $V_A - V_B$. Si r_1 et r_2 sont les résistances des deux fils AaB et AbB, i_1 et i_2 les intensités des courants qui y circulent, on a

$$V_A - V_B = i_1 r_1, \quad \text{avec} \quad V_A - V_B = i_2 r_2;$$

donc $i_1 r_1 = i_2 r_2$ et par suite

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}.$$

Fig. 826.

II. *Comment faut-il choisir la résistance r_2 pour que, la résistance r_1 étant donnée, il ne passe dans r_1 que la $p^{ième}$ partie du courant principal.*

En régime permanent, il ne peut pas y avoir accumulation d'électricité en un point du circuit, en A par exemple. Si donc I est l'intensité du courant principal, on a

$$I = i_1 + i_2 = i_1\left(1 + \frac{i_2}{i_1}\right) = i_1\left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right).$$

Comme on veut que $i_1 = \frac{I}{p}$, il faudra choisir r_2 de façon à avoir

$$I = \frac{I}{p}\left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right),$$

c'est-à-dire prendre

$$\frac{r_1}{r_2} = p - 1.$$

Le circuit r_1 recevra, par exemple, la millième partie du courant principal, si

$$\frac{r_1}{r_2} = 1000 - 1 = 999,$$

c'est-à-dire si la résistance r_2 est 999 fois plus petite que r_1. On dit que dans ces conditions le circuit r_1 est *shunté* au millième.

911. Problème des conducteurs équivalents. — *Calculer la résistance d'un conducteur* unique qui soit *équivalent à un faisceau de fils dérivés* (c'est-à-dire pouvant leur être substitué sans modifier l'intensité du courant principal). — Comme en régime permanent l'électricité ne peut s'accumuler nulle part, on a, en désignant par I l'intensité du courant principal,

$$[1] \qquad I = i_1 + i_2.$$

Si x est le conducteur équivalent au faisceau AaB, AbB, on aura

$$I = \frac{V_A - V_B}{x};$$

et comme

$$i_1 = \frac{V_A - V_B}{r_1}, \qquad i_2 = \frac{V_A - V_B}{r_2},$$

la relation [1] donne immédiatement

$$[2] \qquad \frac{1}{x} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2}, \qquad \text{d'où} \qquad x = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

En introduisant les conductibilités, on voit que la conductibilité du conducteur équivalent est égale à la somme des conductibilités des fils du faisceau.

Remarque. — Il est clair que la formule [2] s'applique à un nombre quelconque de dérivations.

Il est d'autre part aisé de calculer les intensités I, i_1 et i_2 en appelant E la force électromotrice de la pile et R la résistance APB.

En effet, la résistance du circuit à fil unique serait

$$R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2};$$

donc

$$I = \frac{E}{R + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}$$

et par suite

$$i_1 = I \frac{r_1}{r_1 + r_2}, \qquad i_2 = I \frac{r_2}{r_1 + r_2}.$$

912. **Problème du pont.** — *On demande où il faudra jeter un pont conducteur ab entre les deux dérivations AaB, AbB (fig. 826), pour qu'il ne passe pas de courant dans ce troisième fil.*

Il est clair qu'il faut et qu'il suffit que les deux points a et b soient au même potentiel.

Supposons le problème résolu et soient r_1, r_2, r_3, r_4 la résistance des quatre segments conducteurs déterminés par les points A, B, a et b.

Le potentiel en a a pour valeur

$$V_A - r_1 i_1 \qquad \text{ou encore} \qquad V_B + r_2 i_1.$$

De même le potentiel en b est

$$V_A - r_3 i_2 \qquad \text{ou encore} \qquad V_B + r_4 i_2.$$

On a donc d'une part

$$V_A - r_1 i_1 = V_A - r_3 i_2 \qquad \text{ou} \qquad r_1 i_1 = r_3 i_2$$

et d'autre part

$$r_2 i_1 = r_4 i_2 \qquad \text{d'où, en divisant membre à membre} \qquad \frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}.$$

Telle est la condition cherchée.

913. **Loi de Joule et Phénomène de Peltier. — Puissance de la pile.** — La loi de ohm, jointe à l'expression du travail électrique, conduit à la conséquence suivante. Si e est la différence de potentiel entre deux points et I l'intensité

du courant, le travail libéré en 1 seconde, par la chute de cette quantité d'électricité entre les deux points, est $eI = I^2 r$, puisque $I = \frac{e}{r}$.

L'énergie libérée sur l'élément de circuit et par unité de temps est donc égale à $I^2 r$.

Comme elle n'est pas utilisée, elle apparaît sous forme de chaleur. La quantité de chaleur équivalente q a pour valeur le quotient de $I^2 r$ par l'équivalent mécanique de la calorie

$$q = \frac{I^2 r}{E}.$$

Cette loi, découverte par Joule, est facile à vérifier par des mesures électriques et calorimétriques.

Pour la même raison, si E' est la différence de potentiels au contact de deux corps, le courant fournira ou absorbera au contact la quantité E'I d'énergie. Ce phénomène a été découvert par *Peltier*.

Si R est la résistance totale du circuit, l'énergie libérée en 1 seconde a pour expression

$$RI^2 \quad \text{ou} \quad EI \text{ puisque } E = RI;$$

donc on peut dire que la force électromotrice est la puissance de la pile lorsque chaque section de son circuit est traversée par l'unité d'électricité en 1 seconde.

L'énergie EI produite par seconde est la *puissance* P de la pile dans les conditions où elle fonctionne. Elle est exprimée en watts lorsque E et I le sont en volts et en ampères.

Le régime qui fournit par seconde le maximum de travail utile correspond au groupement qui réduit de moitié l'intensité du courant que donne la pile fermée uniquement sur la résistance passive[1]. Il s'ensuit que le *maximum de travail rendu disponible en une seconde* par une pile, de force électromotrice e et de résistance intérieure ρ, serait $\frac{e^2}{4\rho}$.

CHAPITRE III

MODIFICATIONS DE LA PILE DE VOLTA. — PILES A COURANT CONSTANT.

914. Affaiblissement et variabilité du courant dans les piles voltaïques. — La pile de Volta et ses diverses modifications décrites précédemment sont appelées *piles à un seul liquide*. Elles présentent toutes le grave inconvénient de donner des courants dont l'intensité est *variable* et *décroît* rapidement.

L'affaiblissement de la pile de Volta est facile à expliquer en examinant les *réactions* chimiques auxquelles donne lieu la *fermeture du circuit* L'eau acidulée est en effet décomposée.

1. *Voir J. Joubert, Traité élémentaire d'électricité.*

l'oxygène se porte sur le zinc où se forme du sulfate de zinc SO^4Zn, l'hydrogène se rend sur l'électrode de cuivre, qui se trouve en quelque sorte enfermée dans une gaine gazeuse. Ces faits modifient les différences de potentiel des corps en contact puisque de nouveaux corps apparaissent. On comprend donc qu'il y ait des modifications apportées dans la force électromotrice primitive. Cet affaiblissement porte le nom de *polarisation* de la pile.

Enfin une troisième cause d'affaiblissement toute chimique, commune à tous les éléments de piles à zinc, tient à l'impureté de ce métal. Le zinc du commerce, souvent même celui qui est vendu comme zinc pur, contient du fer et d'autres métaux. Il en résulte qu'il se forme avec l'eau acidulée, sur la lame de zinc, un grand nombre de petits couples locaux entre le zinc et les métaux moins attaquables : de là une usure rapide du zinc et des autres éléments du couple, qui se continue même quand le circuit n'est pas fermé et que la pile ne fonctionne pas.

915. **Piles à courant constant.** — Pour obtenir un courant constant, il faut supprimer dans l'élément de pile employé ces causes d'affaiblissement et de variabilité du courant.

On supprime d'abord les courants parasites et secondaires dus au zinc impur, en employant des électrodes en *zinc pur* ou en *zinc amalgamé*, c'est-à-dire allié au mercure sur toute l'étendue de sa surface. M. de la Rive a découvert, en effet, que le *zinc pur* n'est pas attaqué par l'eau acidulée d'acide sulfurique, tandis que le zinc du commerce est vivement attaqué et rapidement détruit. L'attaque du zinc pur n'a lieu qu'autant qu'on le met en contact avec une autre électrode en cuivre ou en platine, également plongée dans l'eau acidulée : c'est le cas d'un élément de pile voltaïque. Ainsi une électrode en zinc pur présentera le double avantage de n'être attaquée et usée que lorsque le circuit de la pile est fermé, et de ne pas donner naissance à des courants locaux et secondaires pendant le fonctionnement de la pile. On a découvert plus tard que le *zinc amalgamé* possède la même propriété que le zinc pur, et on l'emploie de préférence à celui-ci, à cause de la plus grande facilité qu'on a à se le procurer.

On supprime ensuite, ou l'on atténue considérablement, les courants de polarisation en introduisant dans l'élément de pile des substances accessoires capables de détruire les produits secondaires qui causent la polarisation. Ces substances auxiliaires sont appelées *corps dépolarisants* ou simplement *dépolarisants*.

Les piles dans lesquelles on a supprimé les deux causes principales d'affaiblissement du courant sont dites *piles à courant constant*.

Le dépolarisant est le plus souvent un liquide. C'est pourquoi les piles à courant constant sont le plus souvent des *piles à deux liquides*. On les appelle aussi quelquefois *piles cloisonnées*, parce que les deux liquides sont généralement séparés dans chaque élément à l'aide d'une *cloison poreuse*.

Le dépolarisant employé peut être aussi une *substance solide*. La pile est alors une *pile à courant constant* et *à un seul liquide*.

On peut donc diviser les piles hydro-électriques en deux grandes catégories :

1° Les *piles à un seul liquide*, avec ou sans *dépolarisant solide*;

2° Les *piles à deux liquides*, dont l'un joue le rôle de dépolarisant[1].

Le type des piles à un seul liquide, *sans dépolarisant*, est la *pile de Volta*. Le type des piles à un seul liquide avec dépolarisant est la *pile Leclanché*. Celui des types à deux liquides dont l'un est *dépolarisant*, est la *pile Daniell* : elle est de beaucoup *la plus constante* de toutes les *piles usuelles à dépolarisant*.

Fig. 827.

916. **Pile de Becquerel.** — L'*élément Becquerel* est le plus ancien des couples à deux liquides. Il fut réellement inventé par le physicien français Becquerel, qui dès 1829 en indiqua le principe. Il reçut plus tard, en 1836, une forme pratique du physicien anglais Daniell, dont il a gardé le nom indûment.

C'est un élément Volta (zinc-cuivre-eau acidulée), auquel on ajoute, comme *dépolarisant*, une solution concentrée de *sulfate de cuivre*.

Description. — Le pôle négatif est une large lame de zinc *amalgamé* Z, contournée en forme de cylindre coupé suivant une de ses génératrices; il est immergé soit dans de l'eau acidulée d'acide sulfurique, soit dans de l'eau salée, soit dans une solution

1. Voir le *Traité élémentaire d'électricité* de M. R. Colson.

de sulfate de zinc : ce premier liquide est contenu dans un premier vase, en verre ou en faïence (fig. 828).

Le pôle positif C est constitué par un cylindre de cuivre, qui est immergé dans une solution concentrée de sulfate de cuivre, contenue dans un vase en terre poreuse ou en porcelaine dégourdie : ce deuxième vase est placé à l'intérieur du premier.

Fonction chimique du dépolarisant. — Le sulfate de cuivre est décomposé par l'hydrogène, en cuivre et en acide sulfurique, d'après la formule

$$SO^4Cu + H = Cu + SO^4,H_2$$

Le cuivre réduit se dépose sur le pôle cuivre C, où il forme une couche sans adhérence; l'acide sulfurique, rendu libre, se diffuse à travers la cloison poreuse dans l'eau acidulée qui baigne le pôle zinc, et en entretient l'acidité.

Cette pile fournit un courant très constant, surtout si l'on a soin de maintenir saturée la solution de sulfate de cuivre, en plaçant en haut du vase poreux de gros cristaux de sel qui se dissolvent au fur et à mesure de l'appauvrissement de la liqueur. Mais elle a l'inconvénient de s'user en *circuit ouvert*, surtout lorsque le zinc est en contact avec de l'eau acidulée ou salée.

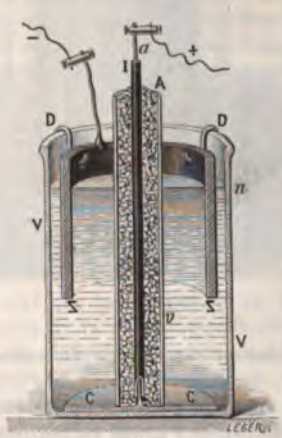


Fig. 828.

Constantes de l'élément Becquerel. — La force électromotrice E est sensiblement égale à 1 volt.

La résistance intérieure R est variable suivant la surface des électrodes, la structure des vases poreux et la composition ou la concentration des liquides. Elle varie de 1/5 d'ohm à quelques ohms dans les modèles employés généralement.

917. **Modifications de l'élément Becquerel.** — L'élément Becquerel a reçu un grand nombre de modifications. La plus importante a été la suppression du vase poreux : la séparation du dépolarisant et du liquide acide est alors obtenue uniquement par la différence de leurs densités. Tel est l'*élément Callaud*, dont l'usage est assez répandu dans les services télégraphiques.

1° *Élément Callaud.* — Cet élément est contenu dans un vase unique V de verre ou de faïence (fig. 828). Dans le vase est une plaque de cuivre C à laquelle est soudé un fil de cuivre A, isolé du reste de la pile par un enduit de gutta-percha I. Au-dessus de la plaque est disposée dans un manchon de verre *v* une colonne de cristaux de sulfate de cuivre; dans le liquide est immergé en entier un cylindre de zinc Z, analogue à ceux des éléments Becquerel, mais d'une hauteur deux fois moindre, et suspendu par des crochets D appuyés sur le rebord du vase. La partie inférieure du liquide se sature de sulfate de cuivre, tandis que la partie supérieure est constituée par une dissolution de sulfate de zinc : les deux liquides sont maintenus séparés par la différence de leurs densités. La dépolarisation s'effectue comme dans la pile de Daniell.

La pile de Callaud est non seulement d'une manipulation simple, mais elle procure une notable économie de sulfate de cuivre, et fournit des courants constants pendant des mois, sans nécessiter d'autre soin que d'ajouter un peu d'eau pour remplacer celle qui se perd par l'évaporation; 60 couples suffisent pour faire fonctionner les appareils télégraphiques entre Tours et Bordeaux, par exemple, sans relais.

918. **Pile de Bunsen.** — L'élément de la *pile de Bunsen*, ou *pile à charbon*, inventée en 1843, est un élément caractérisé par

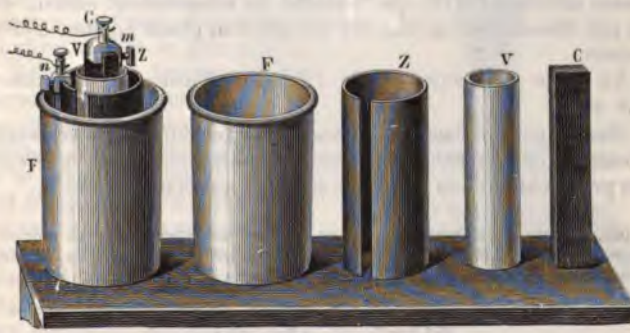


Fig. 829.

un dépolarisant liquide qui est l'*acide azotique*, et par son électrode positive qui est une plaque ou un cylindre d'un charbon spécial[1].

Chaque élément se compose de quatre pièces pouvant se placer les unes dans les autres : 1° un vase F (fig. 829), de grès ou de verre, qu'on remplit d'une solution au dixième d'acide sulfurique ; 2° un cylindre creux Z, de zinc *amalgamé* ; 3° un vase poreux V,

1. Ce charbon est préparé en calcinant, dans un moule de tôle, un mélange intime de coke et de houille grasse, bien pulvérisé et fortement tassé ; ou bien c'est du charbon de cornue pulvérisé et puis aggloméré : ces deux espèces de charbon sont bons conducteurs.

de terre de pipe peu cuite, où l'on met de l'acide azotique ordinaire ; 4° une plaque de charbon C. Dans le vase F on place d'abord le zinc, puis le vase poreux, et au centre le charbon. A ce dernier on fixe une pince de cuivre *m* sur laquelle est une borne avec un fil de cuivre, qui est le réophore positif ; au zinc est fixée une seconde pince *n* avec un fil qui est le réophore négatif.

La pile est inactive tant que la communication n'est pas établie par un conducteur entre le zinc et le charbon ; mais, dès qu'elle a lieu, l'action chimique commence. L'eau acidulée est décomposée par le zinc, avec formation de sulfate de zinc et réduction du dépolarisant par l'hydrogène dégagé, d'après la formule

$$AzO^5, HO + H = AzO^4 + 2HO.$$

Cette réaction est accompagnée alors d'un dégagement de vapeurs nitreuses (AzO^4) qui constitue un inconvénient sérieux de la pile Bunsen dès qu'elle est formée d'un grand nombre d'éléments.

La force électromotrice de l'élément Bunsen est d'environ 1,8 volt.

Remarque. — *Élément de Grove.* — Avant Bunsen, Grove avait constitué un élément avec le même dépolarisant, mais différent du précédent par son électrode positive, qui était en *platine*.

919. **Élément Marié-Davy.** — C'est un élément analogue à celui de Bunsen, mais dont le dépolarisant consiste en une pâte de sulfate de protoxyde de mercure, tassée autour du charbon.

La réaction dépolarisante est exprimée par la formule

$$Hg^2O,SO^3 + H = 2Hg + HO,SO^3.$$

La force électromotrice E = 1,2 volt.

920. **Pile au bichromate à deux liquides.** — L'élément de cette pile ne diffère de l'élément Bunsen qu'en ce que l'acide azotique du vase poreux est remplacé par une solution de 3 kg de bichromate de soude dans 4 litres d'eau ordinaire. Le mélange liquide s'effectue dans un vase de grès ou de porcelaine, puis on verse peu à peu, en agitant avec une baguette de verre, 10 litres d'acide sulfurique à 66° Baumé.

Dans chaque vase de grès on place avec la solution bichromatée un charbon muni de sa pince, la partie supérieure étant paraffinée ; on met ensuite le zinc dans le vase poreux avec une solution de 80 à 100 grammes de sel marin.

Cette pile offre le grand avantage de ne pas répandre de vapeurs d'acide hypoazotique ; mais elle se polarise très rapidement par suite d'un dépôt d'oxyde de chrome sur le zinc. La force électromotrice initiale est de 1,8 à 2 volts, comme celle de l'élément à un seul liquide ; mais la résistance intérieure est plus forte, à cause de l'interposition du vase poreux.

921. Piles à un seul liquide avec dépolarisant liquide. — Pile au bichromate. — Les piles à un seul liquide, qui sont munies d'un dépolarisant liquide, rentrent dans la catégorie des piles à courant constant. Ce *dépolarisant* est toujours un bichromate de potasse ou de soude, ou de l'acide chromique en dissolution. Les différents modèles de ces éléments ne diffèrent que par les proportions du bichromate qui entre dans la composition du liquide. Le type de ces éléments est l'élément ou la pile dite *au bichromate de potasse*.

Pile au bichromate (à un seul liquide). — Le liquide unique consiste en une dissolution de bichromate de potasse additionnée d'acide sulfurique. Il n'y a qu'un vase extérieur en verre, contenant le liquide, et pas de vase poreux. Le pôle positif est constitué par deux plaques de charbon de cornue, fixées parallèlement sur un disque de caoutchouc durci. Une lame de zinc *amalgamé*, d'une longueur moitié moindre, peut être introduite entre ces plaques, à l'aide d'une tige à coulisse : c'est le *pôle négatif*. L'élément ne fonctionne que lorsqu'on fait glisser le zinc dans sa coulisse, de manière à le faire plonger dans le liquide (fig. 850). Il se produit, quand le circuit est fermé, un sulfate double de chrome et de potasse avec dégagement d'oxygène. C'est cet oxygène qui, en brûlant l'hydrogène dégagé, supprime la polarisation des électrodes. Aussi cette pile, quoique à un seul liquide, ne se polarise-t-elle que lentement.

Fig. 850.

Constantes. — La force électromotrice E varie de 1,8 à 2 volts. La résistance intérieure R est d'autant plus *faible* que la proportion d'acide sulfurique est plus *forte* : elle est généralement de *quelques centièmes d'ohm*.

922. **Pile à un seul liquide, avec dépolarisant solide. — Pile de Leclanché.** — Les éléments, à courant constant, qui rentrent dans cette catégorie, sont les éléments de Leclanché, de Lalande et Chaperon, etc. Nous décrirons, comme type, l'*élément Leclanché*.

Élément Leclanché. — Le pôle positif est une plaque de charbon, surmontée d'une sorte de tête en plomb, qui est enfouie

dans le dépolarisant. Le pôle négatif est constitué par une tige de zinc plongée dans une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque. Le *dépolarisant solide* est constitué par un mélange de peroxyde de manganèse et de charbon de cornue en gros grains. Lorsqu'on ferme le circuit, le zinc est attaqué par le chlorhydrate, et il se forme du chlorure de zinc, qui est soluble ; quant à l'hydrogène dégagé, il se porte sur le peroxyde, et le ramène à l'état de sesquioxyde en formant de l'eau.

Dans un premier modèle de cet élément, un vase poreux contenait

Fig. 851.

Fig. 852.

le mélange dépolarisant avec le charbon ; le chlorhydrate était contenu avec le zinc dans un vase extérieur en verre.

Dans un modèle plus récent (fig. 851), le vase poreux est supprimé ; le mélange dépolarisant a été solidifié par pression, et on lui a accolé la lame de charbon. Quant à la tige de zinc, elle est appliquée à la masse à l'aide de bandes de caoutchouc, et simplement isolée par l'interposition d'une plaque en bois.

Modèle Leclanché-Barbier. — Dans le dernier modèle (fig. 852) le zinc Z est maintenu suivant l'axe du bocal. Concentriquement se trouve un cylindre creux C, formé par l'agglomération de graphite et de bioxyde de manganèse pulvérisés ; ces matières sont mélangées avec du suif et un peu de soufre, puis moulées à la forme voulue sous pression et chauffées à 550°. Le produit obtenu est poreux, de sorte que l'hydrogène dégagé peut pénétrer jusqu'au bioxyde de manganèse.

Constantes de l'élément Leclanché. — Cet élément présente

l'avantage de ne *travailler* qu'en circuit fermé. Aussi peut-il fonctionner sans interruption pendant plusieurs mois et l'emploi en est très commode. Les constantes sont :

Force électromotrice		1,48 volt
Résistance intérieure	1° élément à vase poreux	de 4 à 8 ohm
	2° élément à agglomérés	de 0,9 à 1,8 ohm

923. **Piles étalons.** — Certaines piles sont employées comme étalons, à cause de leur constance, dans la comparaison des forces électromotrices. Nous citerons les principaux :

1° *Étalon Daniell-Fleming.* — Il se compose (fig. 833) d'un tube en U, dont l'une des branches renferme un cylindre de zinc pur Z, plongeant dans une dissolution de sulfate de zinc (densité = 1,400), laquelle affleure au-dessous de l'ajutage R'''. Une tige de cuivre C, cuivrée par électrolyse, plonge dans une dissolution de sulfate de cuivre (densité = 1,100). Cette colonne de sulfate va de R''' en C. Le robinet inférieur R'' sert à vider la pile. En ouvrant le robinet, il est aisé de remplir la pile du sulfate de zinc contenu dans le vase A. Le zinc étant mis en place, on ouvre les robinets R'' et R'; le sulfate de cuivre remplit alors la branche de droite. On règle l'écoulement de manière que la surface de séparation des deux dissolutions soit en R'''.

La force électromotrice de cet étalon est de 1,072 volt.

Fig. 833.

2° *Étalon Gouy.* — Cet élément est facile à établir. On prend un petit flacon à deux tubulures au fond duquel on place du mercure (fig. 834). Un fil de platine, isolé dans un tube à thermomètre, vient plonger dans le mercure par son extrémité et sort du flacon par la tubulure latérale. Après avoir introduit dans le flacon une couche convenable d'oxyde de mercure précipité et une dissolution de sulfate de zinc, de densité 1,06, on fixe dans la tubulure centrale un tube à essai, percé d'un petit trou o et contenant un crayon de zinc amalgamé.

La force électromotrice est de 1,389 volt à 17°.

5° *Étalon Latimer-Clark.* — Voici comment on construit cet élément (fig. 835). Deux tubes à essai, portant à la partie inférieure des prises de contact au mercure, communiquent par un tube transversal. A la partie inférieure de l'un des tubes latéraux on

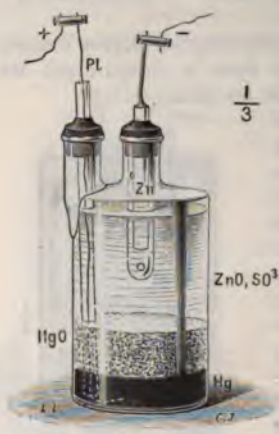


Fig. 834.

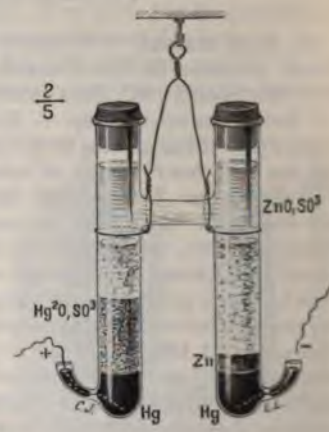


Fig. 835.

introduit un amalgame de zinc et dans l'autre du mercure pur recouvert de sulfate mercureux. On ajoute ensuite une dissolution saturée de sulfate de zinc et des cristaux de sulfate de zinc pour éviter la sursaturation jusqu'au-dessus du tube transversal.

La force électromotrice du Latimer est de 1,438 volt à 15°.

Remarque. — Tous ces étalons sont hermétiquement bouchés et paraffinés. On a soin de les noircir extérieurement pour les préserver de l'action de la lumière.

CHAPITRE IV

EFFETS DIVERS DES COURANTS CONTINUS : EFFETS PHYSIOLOGIQUES. — EFFETS CHIMIQUES ET ÉLECTROLYSE.

EFFETS PHYSIOLOGIQUES.

924. Actions sur les nerfs et sur les muscles. — Les effets physiologiques des courants furent les premiers observés, puisque c'est à eux qu'est due la découverte de l'électricité dynamique par Galvani. Ils consistent en *commotions* et en *contractions musculaires*.

1° En prenant dans les deux mains les rhéophores d'une pile, on ressent une commotion plus ou moins violente, comparable à celle de la bouteille de Leyde, surtout si les mains sont mouillées d'eau acidulée ou salée, ce qui augmente la conductibilité. La commotion est plus intense au moment où on lâche l'un des rhéophores. Avec une pile de Bunsen de 50 à 60 couples petit modèle, la commotion est forte ; avec 150 à 200 couples, elle est douloureuse, et même dangereuse. Elle se fait ressentir moins avant dans les bras que la commotion de la bouteille de Leyde et, transmise par une chaîne de plusieurs personnes, elle n'est ressentie que par celles qui sont les plus rapprochées des pôles.

2° Les effets physiologiques des courants ne sont pas les mêmes sur les nerfs sensitifs, sur les nerfs moteurs et sur les muscles. Si le courant agit sur les premiers seuls, il y a douleur ; sur les seconds, il y a commotion ; sur les muscles, il y a contraction, mais il faut alors un courant à plus forte tension.

3° Tous ces effets ne se font sentir qu'à la fermeture et à l'ouverture du courant, et ils cessent aussitôt que le courant est établi. Toutefois avec des courants très énergiques les commotions et les sensations persistent ; seulement elles sont beaucoup plus faibles qu'à la fermeture et à l'ouverture du circuit.

4° Enfin, les effets des courants sur les nerfs varient suivant qu'ils se propagent dans le sens des ramifications nerveuses ou *en sens contraire*.

Remarque. — Du reste, la question des effets de l'électricité sur *les organismes vivants* est encore, à notre avis, si obscure dans ses

origines aussi bien que dans ses applications, que nous croyons devoir nous en tenir à ces généralités.

EFFETS CHIMIQUES. — LOIS DE L'ÉLECTROLYSE.

925. **Expérience fondamentale : Décomposition de l'eau dans le voltamètre.** — Le premier effet chimique observé fut la décomposition de l'eau, opérée en 1800 par Carlisle et Nicholson, à l'aide d'une pile à colonnes. L'eau doit contenir en dissolution un sel, un acide ou une base qui augmente sa conductibilité; sinon la décomposition est très lente, parce que, l'eau pure étant fort peu conductrice, il n'y passe qu'un courant très faible. L'appareil dont on se sert pour cette expérience est appelé *voltamètre*. Il se compose d'un vase en verre, mastiqué dans un socle de bois (fig. 856). Le fond du vase est traversé par deux fils de platine *h* et *n*, isolés l'un de l'autre et reliés respectivement à deux bornes de cuivre, fixées sur les côtés de l'appareil, par où ils sont mis en communication avec les pôles de la pile. Après avoir rempli le vase avec l'eau rendue conductrice, on pose sur les fils de platine deux cloches pleines du même liquide, puis on établit le courant. Aussitôt l'eau est décomposée en oxygène et en hydrogène qui se dégagent dans les cloches. On vérifie alors que la cloche positive se remplit d'oxygène, et la cloche négative d'hydrogène; on constate que le volume de ce dernier gaz est double du premier. Cette expérience réalise donc à la fois l'analyse qualitative et l'analyse quantitative de l'eau.

Fig. 856.

Remarque. — *Définitions.* — Les substances qui, comme l'eau, sont décomposées par le courant, ont reçu de Faraday le nom d'*électrolytes*, et il a appelé électrolysation ou *électrolyse* le fait même de la décomposition par le courant. Enfin les surfaces métalliques qui établissent la communication entre la substance électrolysée ou électrolyte et le circuit général de la pile sont appe

lées *électrodes*. Celle qui amène le courant est l'*anode*; l'électrode de sortie est la *cathode*.

926. **Lois expérimentales de l'électrolyse.** — 1° Si l'on dispose à la suite les uns des autres une série de voltamètres, V, V', V'', et qu'on les fasse traverser par un même courant (fig. 837), on observe que le poids d'hydrogène recueilli dans chacun d'eux est le même dans le même temps, quelles que soient, dans les différents voltamètres, la matière et la distance des électrodes, la proportion et la nature de l'acide ou de la base. On exprime ce fait en disant que :

L'intensité électrochimique du courant est la même en tous les points du circuit extérieur de la pile.

2° Daniell a reconnu également que la quantité de gaz recueillie

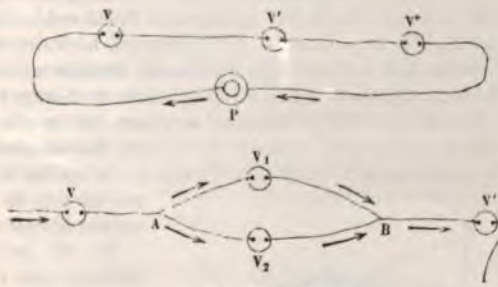


Fig. 837 et 838.

dans l'intérieur d'un élément est la même que dans les voltamètres extérieurs. D'où l'on conclut que :

L'intensité électrochimique du courant à l'intérieur de la pile est la même qu'à l'extérieur.

3° Enfin, si le rhéophore partant du pôle positif de la pile se bifurque en deux fils qui se rendent séparément à deux voltamètres identiques V_1 et V_2, et se réunissent ensuite en un fil unique aboutissant au pôle négatif de la pile (fig. 838), on recueille dans chaque voltamètre des quantités d'hydrogène égales entre elles; de plus, chacune est exactement la moitié, en temps égaux, du gaz obtenu quand le courant passe tout entier dans un seul des deux voltamètres. D'après l'idée qu'on se fait d'un courant électrique, il est évident, à priori, que la quantité d'électricité qui passe en une seconde par l'un ou l'autre voltamètre est la moitié de la quantité qui passe en une seconde par le circuit principal. On peut donc exprimer le fait précédent en disant que :

Le poids de l'eau décomposée ou de l'hydrogène dégagé dans un temps donné est proportionnel à la quantité d'électricité qui passe dans le voltamètre.

Remarque. — 1° Toutes ces lois se vérifient également avec d'autres électrolytes que l'eau, tels que des sels en dissolution ou en fusion.

2° Il est inutile de s'astreindre à établir deux dérivations identiques. Il suffit, en effet, de constater que la *somme* des volumes d'hydrogène dégagés dans les dérivations est égale au volume dégagé dans un voltamètre placé avant ou après celles-ci.

927. **Électrolyse des composés binaires.** — Les courants exercent sur tous les composés binaires *conducteurs* la même action que sur l'eau.

Oxydes métalliques. — Ils sont tous réduits : l'oxygène se dégage à l'électrode positive et le métal se dépose à l'électrode négative.

Électrolysation de la potasse. — C'est Davy qui la réalisa le premier, en soumettant un morceau de potasse humide au courant de 250 couples voltaïques. A l'électrode positive se dégagea l'oxygène, et à l'électrode négative un métal nouveau, qui était le potassium. Il obtint de la même manière le sodium. Mais ces métaux, à cause de leur grande affinité pour l'oxygène, brûlaient à l'air à mesure qu'ils devenaient libres.

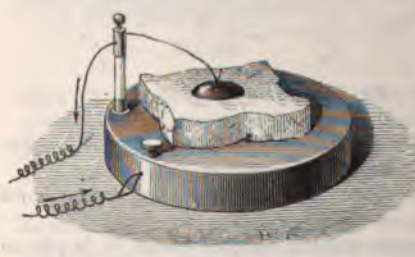


Fig. 859.

On ne peut les préparer par ce procédé qu'en employant le dispositif de Seebeck. Dans un fragment de potasse on pratique une cavité qu'on remplit de mercure ; puis on pose la potasse sur une plaque métallique par laquelle on la fait communiquer avec le pôle positif d'une forte pile (fig. 859), tandis qu'on relie le mercure avec le pôle négatif. Le potassium, se portant alors sur le mercure, s'amalgame avec lui sans brûler. En distillant ensuite cet amalgame dans l'huile de naphte, on a pour résidu le potassium. On opère de la même manière avec la soude.

Oxacides. — Ils sont décomposés de même que les oxydes, et toujours l'oxygène se porte à l'électrode positive et le radical à l'électrode négative.

Hydracides. — Ils sont aussi décomposés, mais leur radical se porte à l'électrode positive et l'hydrogène à l'électrode négative.

Sels haloïdes. — Les composés binaires métalliques, tels que les chlorures, les iodures, les bromures, se décomposent de la même manière : le métal se dépose à l'électrode négative, et le chlore, l'iode, le brome, à l'électrode positive. Ces composés étant pour la plupart peu conducteurs à l'état solide, c'est à l'état de dissolution, ou à l'état de fusion, qu'il faut les soumettre à l'électrolyse.

Remarques. — 1° Les composés binaires non métalliques, comme le sulfure de carbone, le chlorure de soufre, n'étant pas assez conducteurs pour transmettre le courant, ne peuvent être électrolysés qu'à l'état de mélange.

2° Dans toutes ces expériences, il n'apparaît aucune trace de décomposition dans l'intervalle des deux électrodes : ce n'est qu'au contact même des électrodes que la séparation des éléments du corps électrolysé se manifeste.

928. **Électrolyse des sels.** — Les composés ternaires en dissolution sont tous décomposés par la pile, à la condition d'être conducteurs du courant. La décomposition s'opère toujours d'après la loi suivante :

Le métal du sel se dépose à l'électrode négative, tandis que l'acide et l'oxygène de l'oxyde se dégagent à l'électrode positive.

Par exemple, avec le sulfate de cuivre on a

$$SO^4,Cu + HO = SO^4 + Cu + HO,$$

et avec le sulfate de potasse

$$SO^4,K + HO = SO^4 + K + HO.$$

929. **Lois de Faraday.** — Les quantités des électrolytes décomposés, dans des conditions données, sont déterminées par la loi suivante, découverte par Faraday :

Lorsqu'un même courant agit simultanément sur une suite d'électrolytes, les poids de ces corps décomposés dans un même temps sont, en général, dans le même rapport que leurs équivalents chimiques.

Conséquences. — 1° Si l'on place dans le circuit un voltamètre à eau, et qu'on prolonge assez l'expérience pour y décomposer un équivalent d'eau, *un équivalent de chacun des électrolytes sera décomposé dans le même temps.* Si l'on appelle équivalent électrique la quantité d'électricité qui décompose un équivalent d'eau, on peut énoncer cette autre loi : *Quel que soit l'électrolyte qu'il*

traverse, toujours l'équivalent électrique en décompose un équivalent.

2° Enfin, l'intensité du courant étant la même dans toutes les parties du circuit, à l'extérieur et à l'intérieur de la pile, ce n'est pas seulement aux solutions interposées dans le circuit extérieur que la loi de Faraday est applicable, mais à chacun des couples de la pile. De là cette troisième loi : *Pour un équivalent d'électricité envoyé dans le circuit de la pile, un équivalent de zinc est dissous dans chacun des couples de la pile en série.*

3° La loi fondamentale de l'électrolyse peut être énoncée de la façon suivante au point de vue quantitatif :

Un coulomb dépose toujours une fraction de l'équivalent en poids de l'électrolyte qu'il traverse égale à $\frac{1}{96600}$ ou 0,000 010 35. (L'équivalent est exprimé en grammes et rapporté à celui de l'hydrogène pris pour unité.)

Remarques. — 1° En général, le poids du dépôt métallique sur une électrode de surface S étant de m grammes par seconde, le dépôt par unité de surface et par seconde est $\mu = \frac{m}{S}$. Il dépend de la densité du courant $\frac{I}{S}$, c'est-à-dire du rapport de l'intensité du courant à la surface de l'électrode.

2° Il faut, dans le cas des composés supérieurs, prendre pour équivalents ceux qui répondent à des formules semblables à celles des protochlorures, des protoxydes, etc. : on écrira, par exemple, Cu^2Cl, $Fe^{\frac{2}{3}}Cl$, $Sn^{\frac{1}{2}}Cl$, $Fe^{\frac{2}{3}}SO^4$, etc. Ainsi la quantité d'électricité qui libère Fe dans le sulfate de protoxyde de fer $FeSO^4$ libère $Fe^{\frac{2}{3}}$ dans le sulfate de sesquioxyde $Fe^{\frac{2}{3}}SO^4$.

930. **Travail absorbé par l'électrolyse. — Force électromotrice de polarisation.** — Lorsqu'on ferme sur lui-même un voltamètre dans lequel on a fait passer un courant, l'expérience montre qu'il donne naissance à un courant de sens contraire à celui qui a produit l'électrolyse.

Son énergie est empruntée à la recomposition des éléments antérieurement séparés. Soit e la force électromotrice qui produit ce courant et que l'on nomme *force électromotrice de polarisation* du voltamètre; elle existe pendant toute la durée de l'électrolyse, si bien que l'énergie électrique absorbée par seconde dans l'opération et pour un courant d'intensité I a pour expression le produit eI.

Si, d'autre part, la quantité de chaleur qui accompagne la formation d'un équivalent de l'électrolyte considéré est égale à q calories, la décomposition de $\frac{1}{96600}$ d'équivalent exigera une dépense d'énergie égale à

$$\frac{Eq}{96600}$$

(E étant l'équivalent mécanique de la calorie).

Comme I coulombs décomposent par seconde $\frac{I}{96600}$ équivalents, le courant devra fournir au voltamètre $\frac{EIq}{96600}$ unités d'énergie.

Mais le courant fournit l'énergie eI au voltamètre dans le même temps; on a donc

$$eI = \frac{Eq}{96600},$$

d'où

$$e = \frac{Eq}{96600}.$$

Le principe de la conservation de l'énergie conduit ainsi à un procédé de calcul de la force électromotrice de polarisation; cette grandeur représente évidemment aussi *la force électromotrice minimum* dont il faudra disposer *pour déterminer l'électrolyse.*

La constante $\frac{E}{96600}$, qui s'introduit dans ce calcul, a pour valeur 0,0000452 dans le système C. G. S.; donc $e = 0{,}0000452\, q$.

Remarques. — 1° *Force électromotrice minimum d'électrolyse de l'eau.* — S'il s'agit de l'eau, comme $q = 34500$, on a $e = 1{,}49$ volt. Donc on ne pourra jamais décomposer de l'eau si l'électromoteur dont on dispose a une force électromotrice inférieure à 1,49 volt.

2° *Calcul de la force électromotrice d'une pile.* — Prenons pour exemple la pile Becquerel. Dans un élément, l'excès de la chaleur de formation du sulfate de cuivre décomposé sur celle du sulfate de zinc formé fournit l'énergie électrique. Or la thermochimie assigne à q la valeur 25500, d'où $e = 1{,}095$.

931. **Effets secondaires de l'électrolyse.** — Dans l'électrolyse des solutions salines, il se produit souvent des réactions accessoires qui n'ont rien d'électrique et qui peuvent masquer la réaction principale. On les désigne sous le nom d'*effets secondaires* : en voici quelques exemples.

1° Dans les sels à base de potasse ou de soude, le métal qui se dépose à l'électrode négative décompose l'eau en s'emparant de son oxygène et apparaît à l'état d'oxyde en même temps que de l'hydrogène se dégage à cette électrode, et de l'oxygène à l'électrode positive. C'est là un effet secondaire, puisqu'il ne se produit qu'après la décomposition du sel.

2° Avec les sels dont l'oxyde peut prendre un plus haut degré d'oxydation, comme les sels de protoxyde de fer, l'oxygène mis en liberté au pôle positif suroxyde la base du sel, et celui-ci passe à l'état de sel de peroxyde.

3° Dans une solution d'un sel de cuivre, si l'électrode positive est elle-même en cuivre, l'oxygène qui s'y dégage l'attaque en formant de l'oxyde de cuivre; puis ce dernier, se combinant avec l'acide sulfurique qui se rend à la même électrode, reproduit une quantité de sulfate précisément égale à celle qui a été décomposée.

Le premier effet est la décomposition du sulfate de cuivre, et le second est la reproduction d'une quantité égale du même sel. On verra ci-après l'application de cet effet secondaire dans la galvanoplastie, la dorure et l'argenture.

932. **Théorie de Grotthuss.** — Grotthuss a expliqué les décompositions électrochimiques de la manière suivante : Il admet d'abord que, dans tout composé, l'un des éléments est électropositif, et l'autre électronégatif. Il suppose ensuite que, sous l'influence des électricités contraires des électrodes, il se produit dans le liquide où elles plongent une suite de décompositions et de recompositions successives d'une électrode à l'autre, en sorte qu'il n'y a que les éléments des molécules extrêmes qui, ne se recomposant pas, restent libres et se portent aux pôles. L'eau, par exemple, étant formée de 1 atome d'oxygène et de 2 atomes d'hydrogène, et le premier gaz étant électronégatif, le second électropositif, lorsque le liquide est traversé par un courant suffisamment énergique, la molécule *a*, en contact avec le pôle positif, *se polarise*, c'est-à-dire que l'oxygène, qui est électronégatif, se trouve attiré, et l'hydrogène, qui est électropositif, est repoussé (fig. 840). L'oxygène de cette molécule se rendant alors sur l'électrode positive, l'hydrogène mis en liberté s'unit immédiatement à l'oxygène de la molécule *b*, puis l'hydrogène de celle-ci à l'oxygène de la molécule *c*, et ainsi de suite, jusqu'au pôle négatif, où les derniers atomes d'hydrogène restent libres et se dégagent.

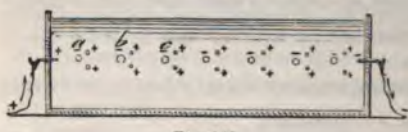


Fig. 840.

La même explication s'applique à la décomposition des oxydes métalliques, des acides et des sels, en un mot à toutes les décompositions électrolytiques. Et c'est ainsi que l'on ne voit apparaître les éléments de l'électrolyse que sur les électrodes mêmes et jamais dans l'intervalle.

CHAPITRE V

EFFETS MÉCANIQUES DES COURANTS. — ÉLECTRODYNAMIQUE.

933. **Effets mécaniques des courants. — Actions mutuelles entre les courants électriques.** — Dans le flux électrique qui constitue les courants, il y a quelquefois transport, dans le sens de leur direction, de matière pondérable. Ainsi, dans l'arc voltaïque, que nous étudierons plus loin, on constate un transport de particules de charbon du pôle positif au pôle négatif : c'est là un effet mécanique des courants. Il en est d'autres beaucoup plus importants : ce sont les mouvements qu'ils produisent

distance, soit sur les aimants mobiles, soit sur des conducteurs mobiles traversés eux-mêmes par des courants.

Les effets mécaniques les plus simples sont les actions mutuelles qui s'exercent entre des conducteurs métalliques parcourus par des courants. Ces phénomènes, dont la découverte est due à Ampère, constituent une branche de l'électricité dynamique qu'on nomme *électrodynamique*. Les effets sont différents, suivant la direction des courants en présence et suivant leurs positions relatives. Ils peuvent être rangés en trois catégories : les effets de *déplacement*, d'*orientation* et de *rotation*.

DÉPLACEMENT DES COURANTS PAR LES COURANTS.

954. Lois des courants parallèles. — 1° *Deux courants parallèles de même sens s'attirent.*

2° *Deux courants parallèles de sens contraires se repoussent.*

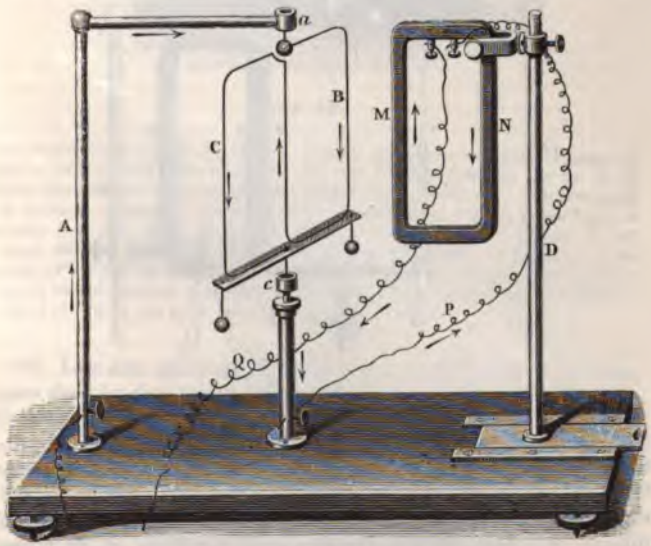


Fig. 841.

Ces lois se démontrent expérimentalement à l'aide d'un appareil *dû à Ampère*, modifié ensuite par Pouillet, et enfin par Obellianne.

Description de l'appareil. — Il se compose de deux colonnes de laiton A et D, entre lesquelles il y en a une plus petite *c*. La colonne D porte un cadre en bois M, appelé *multiplicateur* (fig. 841), qu'on peut fixer à différentes hauteurs au moyen d'une vis de pression et sur lequel le fil conducteur du courant a été enroulé 20 fois, ce qui augmente beaucoup l'action du courant. Ce multiplicateur est maintenu par deux articulations qui permettent, l'une de le renverser sur lui-même (fig. 842), l'autre de le placer horizontalement (fig. 844). La petite colonne est creuse, et dans son intérieur glisse un tube de laiton terminé par un godet *c*, plein de mercure, qu'on peut élever plus ou moins. La colonne A supporte un godet *a*, rempli également de mercure, et qui est percé, en dessous, d'un trou capillaire où s'engage la pointe d'une aiguille à coudre, fixée à une petite boule de laiton. Cette pointe se prolonge jusqu'au mercure et tourne librement dans le trou. Enfin le circuit mobile se compose d'un fil de cuivre rouge partant de la boule de laiton et se contournant, dans le sens des flèches, du godet *a* au godet *c* (fig. 841). Ses deux branches inférieures sont fixées à une mince planchette de bois, et tout le système est lesté par deux petites boules de laiton suspendues aux extrémités.

Vérification des lois. — Le courant d'une pile (de 4 ou 5 couples de Bunsen, par exemple) est amené à l'appareil par la colonne A

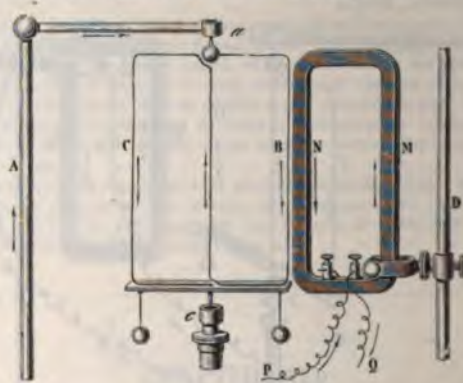


Fig. 842.

(fig. 841) et après avoir parcouru le circuit mobile, puis le multiplicateur dans le sens des flèches, revient à la pile par le fil Q. Or, dans la position de la figure 841, on observe que la branche B est repoussée : ce qui démontre la deuxième loi. Dans la position inverse (fig. 842), où les courants sont *parallèles* et *de même sens*, on observe que la branche B est attirée : ce qui vérifie la première loi.

935. **Commutateur de Bertin.** — Dans ces expériences il est souvent nécessaire de renverser le sens des courants. On y arrive au moyen de petits appareils

qu'on nomme *commutateurs*. On en construit de différents systèmes. Nous décrirons ici le commutateur de Bertin et plus loin celui de Ruhmkorff.

Le commutateur de Bertin a l'avantage de montrer immédiatement le sens du courant. Il consiste en une petite planchette sur laquelle est un disque d'ébonite qu'on fait tourner sur un axe central à l'aide d'une poignée *m* (fig. 843), entre deux arrêts *c*, *c'*. Sur le disque sont fixées deux lames de cuivre, dont l'une *o* est toujours positive, étant en communication par l'axe et par la lame + avec la borne P qui reçoit le rhéophore positif de la pile; l'autre *ie*, recourbée en fer à cheval, est en communication par frottement, au-dessous du disque, avec une lame —, qui se rend à la borne négative N. Sur le bord opposé de la planchette sont deux bornes *b*, *b'*, auxquelles sont adaptées deux lames élastiques de cuivre *r*, *r'*.

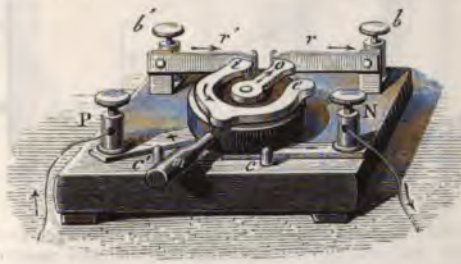


Fig. 843.

Le disque étant tourné (fig. 843), le courant qui arrive à la borne P gagne la pièce *o*, la lame *r* et la borne *b*, qui, par une seconde lame ou par un fil de cuivre, le conduit à l'un des appareils d'Ampère (fig. 841, 842, etc.). Puis, revenant à la borne *b'*, le courant gagne la lame *r'*, la pièce *ie* et enfin la borne N qui le ramène à la pile. Si le disque est tourné de manière que la poignée *m* soit à égale distance de *c* et de *c'*, les pièces *o* et *ie* n'étant plus en contact avec les lames *r*, *r'*, le courant ne passe pas et l'appareil fonctionne comme *interrupteur*. Si *m* est tourné jusqu'en *c*, la lame *o* touchant *r'*, le courant se rend à la borne *b'* d'abord et revient par *b* : il est alors renversé.

936. **Lois des courants angulaires.** — 1° *Deux courants rectilignes dont les directions forment un angle, s'attirent lorsqu'ils s'approchent ou s'éloignent tous les deux du sommet.*

2° *Ils se repoussent si, l'un marchant vers le sommet de l'angle* (ou de la perpendiculaire commune), *l'autre s'en éloigne.*

On démontre ces lois au moyen d'un circuit mobile spécial KBC (fig. 844). Disposant alors le multiplicateur horizontalement, de façon que son courant soit de même sens que dans le circuit mobile, si l'on écarte celui-ci et qu'on fasse passer le courant, le circuit se *rapproche* aussitôt. Et si l'on retourne le multiplicateur de façon que les courants soient de sens contraires, il y a aussitôt répulsion.

Conséquence. — Ampère a conclu de cette loi que, *dans un courant rectiligne, deux éléments consécutifs se repoussent.*

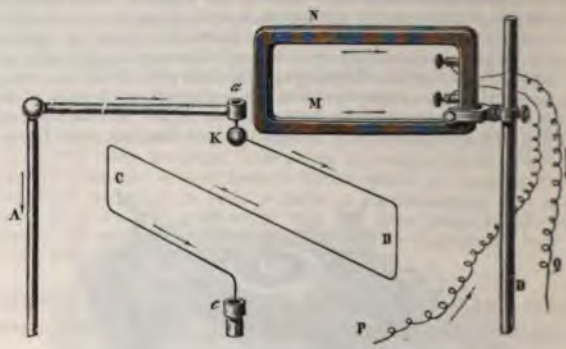


Fig. 844.

On vérifie ordinairement cette conséquence par l'expérience suivante : Sur une planchette sont pratiquées deux cavités longitudinales contenant du mercure, et les deux bains sont reliés par un fil de cuivre recourbé, qui repose dessus. Dès qu'un courant arrivant par la borne *a* (fig. 845) passe du premier bain au deuxième par l'intermédiaire du fil de cuivre, celui-ci est repoussé et

Fig. 845.

s'éloigne des deux bornes. On en conclut que les éléments de courant en contact sur le mercure et le cuivre se repoussent ; mais il est à remarquer que les éléments de courant qui agissent l'un sur l'autre sont plutôt angulaires que rectilignes.

937. **Loi des courants sinueux.** — *L'action attractive ou répulsive d'un courant sinueux est la même que celle d'un courant rectiligne ayant mêmes extrémités.*

Cette loi ne se vérifie qu'autant que l'écart des sinuosités est *très petit*, c'est-à-dire négligeable par rapport à la longueur du circuit sinueux et à la distance du circuit voisin. On dispose le

multiplicateur verticalement (fig. 846), et l'on place tout auprès un circuit mobile *mn*, composé d'une partie rectiligne descendante et d'une partie sinueuse ascendante. Lorsque le courant passe, on

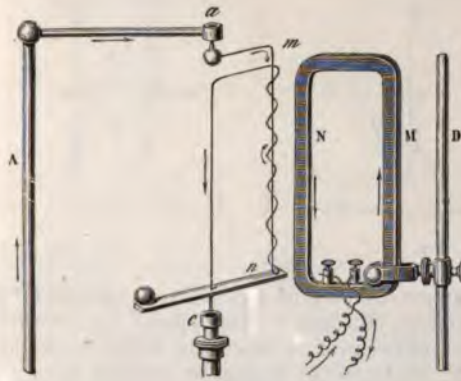


Fig. 846.

n'observe ni attraction ni répulsion : ce qui prouve que les actions contraires du multiplicateur sur le fil rectiligne et sur le fil sinueux sont égales.

ORIENTATION DES COURANTS PAR LES COURANTS.

938. **Action d'un courant indéfini sur un courant perpendiculaire à sa direction.** — D'après la loi des courants angulaires on peut déterminer à priori l'action qu'exerce un courant rectiligne PQ (fig. 847), fixe et indéfini, sur un courant mobile KH perpendiculaire à sa direction. Soit OK la perpendiculaire commune (laquelle se réduit à un point si les deux lignes PQ et KH se rencontrent).

Supposons que le courant PQ soit dirigé de Q vers P dans le sens des flèches et soit d'abord le cas où le courant HK se rapproche du courant PQ. La portion QO attire le courant HK, puisque ces courants se dirigent tous les deux vers le sommet de l'angle formé par leurs directions; la portion PO repousse au contraire le courant KH, puisque les deux courants sont de sens opposés *par rapport au sommet* de l'angle. Représentons par mq et mp

les deux forces, l'une attractive, l'autre répulsive, qui sollicitent le courant KH, et qui sont de même intensité, puisque tout est symétrique des deux côtés du point O : elles se composent en

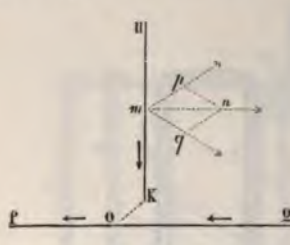


Fig. 847.

Fig. 848.

une force unique *mn* qui tend à entraîner le courant KH parallèlement au courant PQ, dans un sens opposé à ce dernier.

Si l'on considère le cas où le courant KH s'éloigne du courant PQ (fig. 848), on reconnaît facilement qu'il est encore entraîné parallèlement à ce courant, mais dans le même sens que lui.

On peut donc énoncer cette loi : *Un courant fini mobile, qui est perpendiculaire à un courant fixe indéfini, est sollicité à se mouvoir dans une direction parallèle au courant fixe : en sens contraire du courant fixe s'il s'en approche, et dans le même sens s'il s'en éloigne.*

939. **Conséquences.** — 1° *Orientation d'un courant vertical*

Fig. 849.

Fig. 850.

unique. — Si l'on a un courant vertical, mobile autour d'un axe XY parallèle à sa direction (fig. 849 et 850), tout courant horizontal PQ aura pour effet de faire tourner le courant mobile autour de son axe, jusqu'à ce que le plan défini par l'axe et le courant soit devenu parallèle à PQ; le courant vertical s'arrêtera, par

rapport à son axe, *du côté d'où vient le courant* PQ (fig. 849), *ou du côté où il se dirige* (fig. 850), *selon qu'il est descendant ou as-*

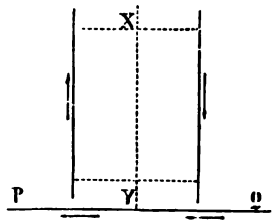


Fig. 851.

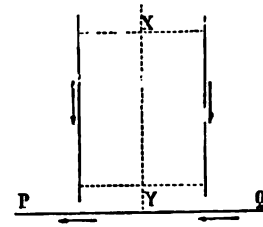


Fig. 852.

cendant, c'est-à-dire selon qu'il s'approche ou qu'il s'écarte du courant horizontal.

2° *Orientation d'un double courant vertical.* — Un système de deux courants verticaux, mobiles ensemble autour d'un axe vertical (fig. 851 et 852), sera dirigé, par un courant horizontal PQ, dans un plan parallèle à ce courant, quand des deux courants verticaux l'un est ascendant et l'autre descendant (fig. 851); mais s'ils sont tous deux descendants (fig. 852), ou tous deux ascendants, le système ne sera pas dirigé.

940. **Action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant rectangulaire ou circulaire.** — Il est facile de reconnaître qu'un

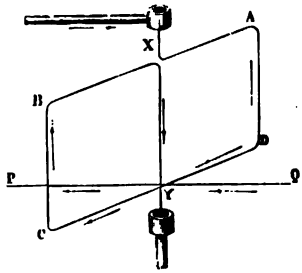


Fig. 853.

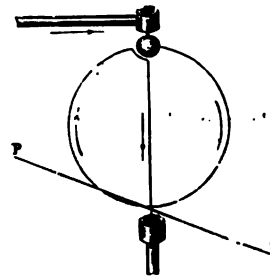


Fig. 854.

courant horizontal indéfini exerce sur un courant rectangulaire mobile autour d'un axe vertical (fig. 853) la même action directrice *que ci-dessus*. En effet, d'après la direction des courants *(marquée par les flèches)*, la portion QY agit par attraction non

seulement sur la portion horizontale YD (loi des courants angulaires), mais sur la partie verticale AD (loi des courants perpendiculaires). La même action a évidemment lieu entre la portion PY, et les parties CY et BC. Donc *le courant fixe* PQ *tend à diriger le courant rectangulaire mobile* ADCB *dans une position parallèle à* PQ, *et telle que, dans les fils* CD *et* PQ, *le sens des deux courants soit le même.*

Remarque. — Tout ce qu'on vient de dire d'un courant rectangulaire s'applique également à un courant circulaire (fig. 854).

ROTATION DES COURANTS SOUS L'INFLUENCE DES COURANTS.

941. **Rotation d'un courant horizontal fini sous l'influence d'un courant rectiligne horizontal indéfini.** — Les attractions et les répulsions qu'exercent entre eux les courants angulaires peuvent produire, au lieu d'un simple déplacement, *un mouvement circulaire continu.*

En effet, soit un courant OA (fig. 855), mobile autour du point

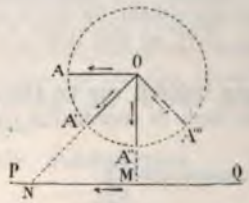


Fig. 855.

Fig. 856.

O dans un plan horizontal, et soit PQ un courant indéfini horizontal. Ces courants étant dirigés dans le sens des flèches, il s'ensuit qu'en OA le courant mobile est attiré par le courant PQ, puisqu'ils sont de même sens. Arrivé en OA', le courant mobile est attiré par la portion NQ du courant fixe et repoussé par la portion PN. De même, en OA'', il est attiré par MQ et repoussé par PM, et ainsi de suite : d'où résulte un mouvement de rotation continu dans le sens AA'A''A'''. Donc, *par l'effet du courant fixe et indéfini* PQ, *le courant mobile* OA *tend à tourner d'un mouvement continu dans une direction rétrograde par rapport à celle du courant fixe.* Si le courant mobile était dirigé de A vers O, la rotation aurait lieu en sens contraire.

942. **Rotation d'un courant horizontal fini sous l'influence**

d'un courant circulaire horizontal. — L'effet sera encore *un mouvement circulaire continu* lorsqu'un courant ABC (fig. 856), fixe et circulaire, placé dans un plan horizontal, agira sur un autre courant horizontal *mn*, rectiligne et mobile autour du centre *n*. Ces courants, dirigés dans le sens des flèches, s'attirent dans l'angle *n*AC, car ils vont tous les deux vers le sommet (936, 1°). Dans l'angle *n*AB, au contraire, ils se repoussent, car l'un va vers le sommet, tandis que l'autre s'en éloigne. Les deux effets concourent donc pour faire tourner le fil *mn* dans le sens ACB.

943. **Rotation d'un courant vertical sous l'influence d'un courant circulaire horizontal.** — Un courant circulaire horizontal qui agit sur un courant rectiligne vertical, lui imprime aussi *un mouvement de rotation continu*.

On constate cette rotation au moyen d'un vase de cuivre rouge autour duquel s'enroule une lame de même métal isolée à la soie ou à la laine, et parcourue par un courant (fig. 857). Au

Fig. 857.

centre du vase est une colonne de laiton *a*, terminée par une capsule qui contient du mercure. Dans celui-ci plonge un pivot qui supporte un fil de cuivre rouge *bb*, recourbé à ses extrémités en deux branches verticales qui vont se souder à un anneau très léger de cuivre rouge, plongeant dans de l'eau acidulée contenue dans le vase. Le courant d'une pile arrivant par le fil *m* se rend dans la lame A, d'où, après avoir fait plusieurs tours autour du vase, il arrive à la lame B, et de là gagne, en dessous, la partie inférieure de la colonne *a*. Montant dans cette colonne, il passe dans les fils *bb*, dans l'anneau de cuivre rouge, dans l'eau acidulée, et dans les parois du vase, d'où il revient à la pile par la lame D. Le circuit se trouvant ainsi fermé, l'équipage bb et l'anneau se mettent à tourner en sens contraire du cou-

rant fixe. Ce mouvement est dû à l'action du courant circulaire sur le courant des branches *bb* : la branche *b* de droite est attirée en avant par la portion A du circuit fixe, et la branche *b* de gauche est attirée en sens contraire par la portion opposée. Quant à l'action du courant circulaire sur la partie horizontale du circuit *bb*, elle concourt à faire tourner dans le même sens; mais elle est peu sensible, à cause de la distance.

944. **Loi élémentaire. — Calcul d'Ampère.** — En se fondant sur les lois expérimentales ci-dessus démontrées, Ampère a calculé la *loi élémentaire* des actions électrodynamiques, c'est-à-dire l'expression analytique de la force qui s'exerce entre deux *portions infiniment petites* ou *éléments* de courants, déterminés en intensité et en position.

Soient $m\,n$ et $m'\,n'$ deux éléments de deux courants d'intensités i et i' (fig. 858), soient λ et λ' leurs longueurs, r la distance OO' de leurs milieux, θ et θ' les angles qu'ils font avec la ligne OO', et ω l'angle de leurs deux directions. Ampère est arrivé à l'expression suivante de la force réciproque f, qui s'exerce entre ces deux éléments :

$$[1] \qquad f = \frac{ii'\,\lambda\lambda'}{r^2}\left(\cos\omega - \frac{3}{2}\cos\theta\cos\theta'\right).$$

La force f est *positive* ou *négative*, suivant que les deux courants *se repoussent* ou *s'attirent*.

Fig. 858.

Fig. 859.

945. **Conséquences.** — Connaissant cette loi élémentaire, on peut calculer l'action qui s'exerce entre deux portions finies de courants, placées d'une manière quelconque l'une par rapport à l'autre.

Exemple. — *Action d'un courant indéfini* XY *sur un courant fini* AB (fig. 859). On trouve, en appliquant la formule [1], que l'action se réduit à une force R normale à AB, qui tend à diminuer l'angle des deux courants s'ils s'approchent ou s'ils s'éloignent tous deux du sommet, et qui tend à augmenter l'angle si l'un des courants s'éloigne tandis que l'autre s'approche du sommet.

L'intensité de cette résultante est donnée, dans le cas général, par la formule

$$[2] \qquad R = ii'\left(\frac{l}{h} - \frac{1}{2}\frac{l^2}{h^2}\sin\omega + \cdots\right),$$

où l est la longueur AB, h la distance de l'extrémité A à XY, ω l'angle des courants, et i et i' leurs intensités. Le facteur entre parenthèses est la somme d'une série indéfinie de termes de plus en plus petits.

Cas particulier. — Si h est grand par rapport à l, c'est-à-dire si le courant mobile est à une grande distance, la fraction $\frac{l^2}{h^2}$ est négligeable et, *à fortiori*, les puissances d'un ordre plus élevé. La formule précédente se réduit alors à

$$[3] \qquad R = \frac{ii'l}{h}.$$

Donc l'attraction ou la répulsion d'un courant indéfini sur un courant fini, suffisamment éloigné, est une *force constante, normale au courant mobile, proportionnelle à sa longueur, indépendante de son orientation, et inversement proportionnelle à la simple distance.*

C'est le cas le plus fréquent dans la pratique. Cette formule s'applique en particulier à la plupart des expériences décrites ci-dessus.

COURANT TERRESTRE.

946. Action de la terre sur les courants. — Aux phénomènes électrodynamiques se rattachent les actions que le globe terrestre exerce sur les courants mobiles, isolés de tout autre courant. On a constaté que la terre agit sur eux, comme sur les aimants, en leur imprimant tantôt une orientation déterminée, tantôt un mouvement de rotation continu, suivant que ces courants sont disposés dans une direction verticale ou horizontale.

947. Orientation des courants verticaux. — Loi. — *Tout courant vertical, mobile autour d'un axe qui lui est parallèle, vient se placer, sous l'influence de la terre, dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, et s'arrête, après quelques oscillations, à l'est de son axe de rotation lorsqu'il est descendant, et à l'ouest quand il est ascendant.*

Expérience. — Cette loi se vérifie au moyen d'un appareil formé de deux vases de cuivre rouge a et K (fig. 861) d'inégales grandeurs. Le plus grand a, qui a environ 30 centimètres de diamètre, est percé à son centre d'une ouverture au milieu de laquelle s'élève une colonne de laiton b, isolée du vase a, mais communiquant avec le vase K. Elle se termine par un godet dans lequel repose, par un pivot, une légère tige de bois. A l'une des extrémités de cette tige s'enroule un fil fin de platine ce, dont chaque bout plonge dans de l'eau acidulée qui remplit les deux vases.

Le courant d'une pile arrivant par le fil m passe dans une lame de cuivre qui, par-dessous le support en bois de l'appareil, va se souder au pied de la colonne b; il monte alors en b, gagne le vase K, rempli d'eau acidulée, monte de là dans le fil c, redescend par le fil e, et se rendant aux parois du vase a au travers de l'eau acidulée que celui-ci contient, il atteint le fil n, qui le ramène à la pile. Dès que le circuit est fermé, on voit le fil e se mouvoir autour de la colonne b et s'arrêter *à l'est* de cette colonne lorsqu'il est *descendant*, comme cela a lieu dans le dessin; mais s'il est *ascendant*, ce qu'on obtient à l'aide d'un commutateur n, le fil e s'arrête *à l'ouest*, dans une position diamétralement opposée à la précédente.

Si à la tige à un seul fil on substitue un équipage mobile à deux fils (fig. 860),

il n'est pas dirigé; car, chaque fil tendant à se placer à l'est de la colonne *b*, il se produit deux effets égaux et de directions contraires, qui se font équilibre : le système constitue un courant *astatique*.

Hypothèse du courant terrestre. — De même qu'on explique aisément l'action de la terre sur les aimants par l'hypothèse d'un aimant terrestre, de même on

Fig. 860.

Fig. 861.

explique son action sur un courant vertical par l'hypothèse d'un courant terrestre. Tout se passe dans l'expérience ci-dessus comme si *un courant indéfini, allant de l'est à l'ouest*, agissait sur le courant mobile, *perpendiculairement* à sa direction.

948. **Rotation des courants horizontaux mobiles autour d'un axe vertical.** — *Loi.* — L'action de la terre sur les courants horizontaux ne consiste pas à les

Fig. 862.

diriger, mais à leur imprimer *un mouvement de rotation continu : la rotation a lieu de l'est à l'ouest, en passant par le nord, quand le courant horizontal s'éloigne de l'axe de rotation, et de l'ouest à l'est quand il s'en rapproche.*

Expérience. — Cette loi se démontre au moyen d'un appareil ne différant du précédent que parce qu'il n'a qu'un seul vase (fig. 862). Le courant monte par la colonne *a*, passe dans les deux fils cc et descend par les fils bb, d'où il revient

à la pile. Le circuit *bccb* se met alors à tourner d'un mouvement continu, de l'est à l'ouest ou de l'ouest à l'est, suivant que dans les fils *cc* le courant est centrifuge ou centripète. Or on a vu (947) que l'action de la terre sur les fils verticaux *bb* est détruite; c'est donc bien par son action sur les branches horizontales que la rotation *cc* se produit.

949. **Position du courant terrestre.** — Cette expérience, comme la précédente, peut s'expliquer par l'action d'un courant terrestre, allant de l'est à l'ouest magnétiques. Elle permet, en outre, de déterminer la situation du courant terrestre. En effet, ce courant peut avoir trois positions par rapport au courant horizontal mobile : il peut être soit au nord de ce courant, soit au sud, soit *au-dessous* et *dans le même plan* de l'axe de rotation. Or il résulte des lois de l'électrodynamique, que :

1° Si le courant terrestre était *au nord*, le courant mobile tournerait de l'est à l'ouest, *en passant par le sud*; ce qui est contraire à l'expérience.

2° Si le courant terrestre était *au-dessous*, le courant mobile resterait en équilibre dès qu'il se serait mis parallèle au courant directeur et de même sens : il ne tournerait donc pas d'une manière continue, comme cela a lieu réellement.

3° Si le courant terrestre est *au sud*, les choses doivent, au contraire, se passer comme l'indique l'expérience.

Tout se passe donc comme si le courant terrestre était au sud des courants mobiles. Les phénomènes et, par suite, la conclusion, seraient les mêmes en tous les points de notre hémisphère. D'ailleurs, si l'on se transportait dans l'hémisphère sud, on trouverait qu'en tous les points le mouvement de rotation aurait lieu en sens inverse. On en conclurait, par les mêmes raisonnements, que le courant terrestre est au nord de cet hémisphère.

Donc, en résumé, la terre agit en tout lieu comme *un courant indéfini tournant de l'est à l'ouest, autour et dans le plan même de l'équateur magnétique.*

950. **Orientation des courants fermés, mobiles autour d'un axe vertical.** — Si le circuit est fermé, qu'il soit rectangulaire ou circulaire, ce n'est plus *un mouvement de rotation continu* qui se produit, mais *une simple orientation*, comme dans le cas des courants verticaux.

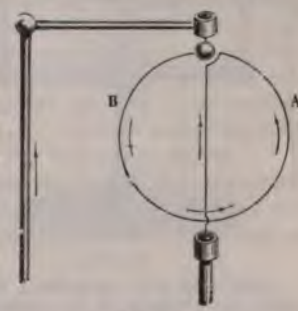


Fig. 863.

Le courant vient se placer dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, de manière qu'il soit descendant à l'est de son axe de rotation pour un observateur qui regarde le nord, et ascendant à l'ouest.

Ce fait est une conséquence directe des lois précédentes. Il en résulte, en effet, que dans le circuit fermé (fig. 863) les actions de la terre sur les parties horizontales, inférieure et supérieure, sont égales et inverses et, par conséquent, se font équilibre, tandis que dans les parties

latérales le courant tend à se placer d'un côté à l'est, de l'autre à l'ouest (loi des courants verticaux).

951. **Courants astatiques.** — Dans les expériences d'électrodynamique, il est donc nécessaire de soustraire les circuits mobiles à l'action directrice de la terre. Pour cela il suffit de leur donner une forme symétrique par rapport à leur axe de suspension. De cette manière les actions directrices de la terre sur les deux parties du circuit tendent à les faire tourner en sens contraires, et, par suite, se détruisent. Cette condition est remplie dans les circuits représentés dans les figures 842 et 844. C'est pourquoi on donne aux courants qui les parcourent le nom de *courants astatiques*.

CHAPITRE VI

EFFETS MÉCANIQUES DES COURANTS.

ÉLECTROMAGNÉTISME.

952. **Effets mécaniques des courants sur les aimants.** — L'action que les courants exercent sur les aimants se manifeste par trois sortes d'effets : 1° effets d'orientation ; 2° effets de rotation ; 3° effets d'attraction ou de répulsion. De plus, tous ces effets sont *réciproques*, c'est-à-dire que, les aimants agissent réciproquement sur les courants, pour les diriger, les faire tourner, les attirer ou les repousser. L'étude de ces actions et réactions entre les aimants et les courants constitue l'*électromagnétisme*.

Fig. 864.

953. **Orientation des aimants par les courants.** — 1° *Expérience d'Œrsted.* — *Règle d'Ampère.* — L'action directrice des courants sur les aimants fut découverte en 1820 par Œrstedt, professeur de physique à Copenhague. C'est une des expériences fondamentales de l'électricité dynamique.

Pour répéter l'expérience d'Œrsted, on tend horizontalement, dans la direction du méridien magnétique, un fil de cuivre au-dessus d'une aiguille aimantée (fig. 864) mobile sur un pivot vertical. Tant que le fil n'est point traversé par un courant, l'aiguille lui demeure parallèle ; mais aussitôt qu'on lance un courant dans le fil, *l'aiguille est déviée*, et elle *se rapproche d'autant plus de la direction perpendiculaire au courant que celui-ci est plus intense.*

Règle d'Ampère. — Le sens de la déviation dépend à la fois de la direction du courant et de la position du fil par rapport à l'aiguille. Ampère a réussi à comprendre et à prévoir tous les cas qui peuvent se présenter dans cet énoncé unique, appelé *règle d'Ampère* : *Le pôle austral de l'aimant mobile est toujours dévié vers la gauche du courant.*

Fig. 865.

Il appelle *gauche* du courant celle d'un observateur placé dans le fil qui réunit les deux pôles, de manière que, le courant entrant par les pieds et sortant par la tête, la face soit tournée vers l'aiguille (fig. 865).

954. **Orientation des courants par les aimants.** — *L'action directrice des courants sur les aimants est réciproque.* — Dans l'expérience d'Œrsted (fig. 864), l'aiguille aimantée étant mobile et le courant fixe, c'est l'aiguille qui se dirige et se met en croix avec le courant. Si, au contraire, l'aimant est fixe et le courant mobile, c'est celui-ci qui se dirige et vient se mettre en croix avec l'aimant, le pôle austral occupant toujours la gauche.

Pour le démontrer, on fait passer un courant dans un circuit mobile (fig. 866). Approchant alors un barreau aimanté, on voit le circuit tourner, et, après quelques oscillations, se mettre en croix avec le barreau.

955. **Rotation des aimants sous l'influence des courants.** — Les effets de rotation ont été démontrés par Faraday, à l'aide des expériences suivantes (fig. 867). 1° Au centre d'une large éprouvette remplie de mercure plonge un barreau aimanté A, de 20 centimètres de longueur environ, lesté à sa partie inférieure par un appendice de platine, et s'élevant de quelques millimètres au-dessus du niveau du mercure. A la partie supérieure du bar-

reau est une cavité contenant du mercure. Un courant, montant par la colonne *m*, arrive au mercure et au barreau, d'où, rayonnant tout autour de celui-ci, il gagne une pièce annulaire de

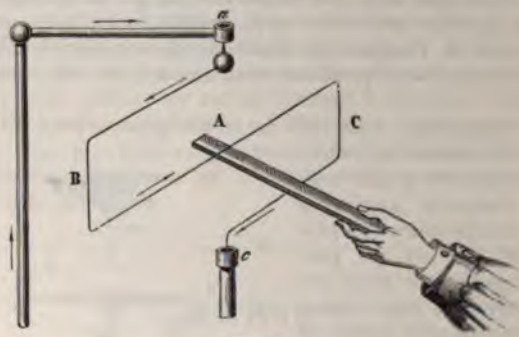


Fig. 866.

cuivre G (fig. 869), qui plonge dans le mercure le long de la paroi de l'éprouvette, gagne la colonne *n* et retourne à la pile. Dès que

Fig. 867. Fig. 868.

le courant passe, on voit le barreau tourner autour de son axe avec une vitesse croissante qui dépend de son moment magnétique et de l'intensité du courant. Quant au sens de la rotation, il dépend de la direction du courant et de la nature du pôle

qui flotte à la surface du mercure. Si c'est le pôle nord et

Fig. 869.

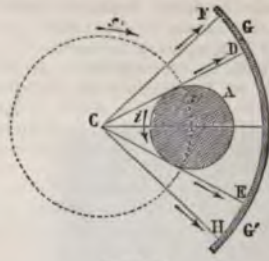


Fig. 870.

que le courant soit descendant vers l'aimant (fig. 867), la rotation se fait dans le sens des aiguilles d'une montre. Elle a lieu en sens contraire si l'on renverse le sens du courant, ou si c'est le pôle sud qui flotte à sa surface.

2° Lorsqu'on dispose l'expérience comme dans la figure 868, le barreau non seulement tourne sur lui-même, mais encore autour de l'axe vertical passant par la tige C (fig. 870).

956. **Rotation des courants sous l'influence des aimants.** — *L'action rotative des courants sur les aimants est réciproque.* — On le vérifie par l'expérience suivante, due à Faraday :

Sur un pied à vis calantes est fixée une colonne de cuivre *bD*, isolée par un contact d'ivoire, le long de laquelle s'élève un tube métallique (fig. 871) entouré d'un faisceau aimanté AB. En haut de la colonne est un godet contenant du mercure dans lequel plonge une pointe d'acier. A celle-ci est fixé un circuit EF en cuivre rouge, dont les bouts portent des pointes d'acier qui plongent dans un réservoir plein de mercure.

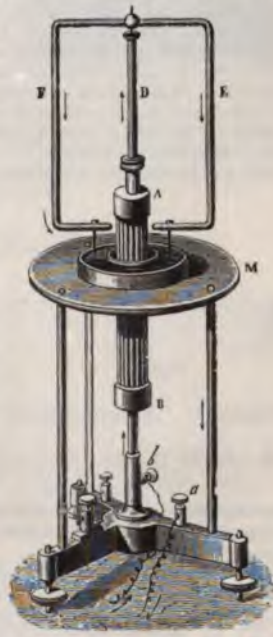


Fig. 871.

On fait arriver le courant d'une pile (4 ou 5 couples Bunsen) à la borne *b*; *de là il monte dans la colonne* D, redescend par les deux branches E, F, gagne

le mercure par les pointes d'acier, et se rend par le support de cuivre à la borne *a*, d'où il revient à la pile. Or, si l'on élève alors le faisceau aimanté, comme le montre le dessin, le circuit mobile EF prend un mouvement de rotation rapide dans un sens ou dans l'autre, suivant qu'il est soumis à l'action du pôle Nord ou du pôle Sud de l'aimant.

957. **Effets de déplacement.** — Ils consistent en attractions et en répulsions exercées par les courants sur les aimants. Ils ont été constatés et étudiés par Biot et Savart; Laplace a déduit de leurs expériences la *loi élémentaire des actions électromagnétiques*, et la formule de Laplace a été vérifiée par des expériences de Pouillet, puis par celles de Boisgiraud.

Expériences de Biot et Savart. — 1° Une aiguille à tricoter aimantée était suspendue par l'une de ses extrémités à un fil très fin; dans le voisinage de l'aiguille on tendait un fil de cuivre horizontal : dès que le courant passait, on observait, suivant le sens, soit une attraction, soit une répulsion.

2° Après avoir constaté l'existence de cette force attractive, ils ont déterminé *suivant quelle loi elle varie avec la distance*. Pour cela, ils prenaient un aimant prismatique très court, suspendu à un fil de soie sans torsion et parfaitement *libre* d'osciller horizontalement, car il était rendu *astatique* au moyen d'un fort barreau aimanté, convenablement disposé dans le voisinage. Un conducteur rectiligne vertical, de 10 pieds de long, était placé successivement à des distances variables du barreau. Dès qu'on lançait ce courant, l'aiguille était déviée conformément à la règle d'Ampère : elle se mettait à osciller comme un pendule géodésique qu'on aurait écarté de sa position d'équilibre. En appliquant la méthode des oscillations, ils évaluaient la force directrice dans chaque position. Ils furent conduits à la loi suivante :

L'action d'un courant vertical indéfini sur un pôle d'aimant varie en raison inverse de la simple distance.

958. **Loi élémentaire. — Formule de Laplace.** — Laplace, en appliquant le calcul à ces lois, a trouvé que l'action exercée par un élément de courant sur un pôle magnétique varie *en raison inverse du carré de la distance et proportionnellement au sinus de l'angle* que fait, avec la direction du courant, la ligne qui joint son centre au pôle magnétique. Cette force est appliquée à l'élément du courant, perpendiculairement au plan déterminé par l'élément et le pôle, et elle est dirigée conformément à la règle d'Ampère (fig. 872). La loi élémentaire est exprimée par la formule

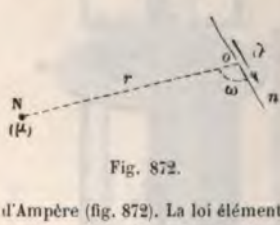


Fig. 872.

$$[1] \qquad f = \frac{\mu I \lambda}{r^2} \sin \omega,$$

dans laquelle f représente l'*action élémentaire*, I l'intensité du courant et λ sa longueur, μ la masse magnétique du pôle, r sa distance et ω l'angle de l'élément avec la ligne NO.

959. **Expressions diverses de la formule de Laplace et Applications.** — L'action élémentaire est susceptible d'une forme plus générale, souvent employée. $\frac{\mu}{r^2}$ est l'action qu'exercerait le pôle μ sur le pôle + 1, placé à l'endroit où se trouve l'élément de courant : c'est le champ produit par le pôle μ à la distance r. Soit H sa valeur, on peut alors écrire

$$[1] \qquad f = HI\lambda \sin \omega.$$

Il suffira donc, pour calculer f, de connaître le champ magnétique *à l'endroit où se trouve l'élément de courant* sans avoir à s'inquiéter de l'origine de ce champ, qui peut évidemment toujours être considéré comme dû à un pôle convenable.

L'action f est perpendiculaire au plan déterminé par le champ et l'élément de courant et dirigée vers la gauche de l'observateur d'Ampère, regardant dans le sens du champ. On peut remarquer encore que $H\lambda \sin \omega$ est l'aire ΔS du parallélogramme ayant H et λ comme côtés, et écrire

[III] $$f = I\Delta S.$$

Calcul de l'action exercée par un champ magnétique uniforme sur un circuit donné (roue de Barlow et courant horizontal). — 1° Considérons (fig. 873) une *roue de Barlow* ou *disque de Faraday* orienté perpendiculairement au méridien magnétique, et mobile autour d'un axe BO dirigé suivant le méridien; un courant d'intensité I, amené par le contact B, va de C en A suivant un rayon et fait retour par le fil AP. D'après la règle précédente, comme $\omega = \frac{\pi}{2}$, la force F qui agit sur OA

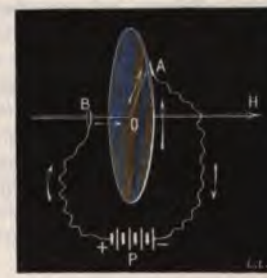


Fig. 873.

a pour valeur HIR; elle est appliquée au milieu du rayon et dans le plan de la roue, car les forces qui agissent sur des éléments égaux de OA sont égales et perpendiculaires à la fois à OA et à H. La roue se mettra donc à tourner dans le sens de la flèche. Le travail par tour est égal à

$$F \times 2\pi \frac{R}{2} = \pi HIR^2 = SHI,$$

S étant la surface du disque.

2° La même formule [I] montre que le système représenté par la figure 872 est astatique pour la composante horizontale du champ terrestre : il subit exclusivement l'action de la composante verticale Z. Si $2d$ est la projection sur l'horizon de la ligne cc, le travail par tour a pour valeur

$$2\pi d^2 ZI.$$

960. Rotation électrodynamique et électromagnétique des liquides. — Dans les expériences d'électrodynamique décrites précédemment, la rotation s'obtient en faisant agir un courant fixe sur un courant linéaire mobile. Il en est de même dans les expériences de rotation électromagnétique. Or cette condition d'un circuit linéaire n'est pas nécessaire. On a déjà vu (fig. 867 et 868) le mouvement de rotation transmis à une masse magnétique plus ou moins considérable, et dès la découverte de l'électrodynamique on démontra que les liquides eux-mêmes, tels que le mercure et l'eau, peuvent tourner, comme des circuits métalliques, par l'action des courants.

SOLÉNOÏDES.

961. **Solénoïdes** et **Cylindres électrodynamiques.** — La ressemblance des courants et des aimants, révélée par l'action directrice de la Terre et confirmée par les actions et les réactions électromagnétiques, est poussée jusqu'à l'identité, pour les actions extérieures, dans les propriétés du solénoïde, imaginé par Ampère.

Le *solénoïde* proprement dit, tel que l'a défini Ampère, n'est qu'une conception mathématique : c'est un assemblage de courants fermés, *infiniment petits*, tous perpendiculaires à une même ligne qui passerait par leurs centres de gravité, et tous dirigés dans le même sens. Le solénoïde le plus simple serait, par exemple, une série de courants circulaires infiniments petits, perpendiculaires à une même droite passant par leurs centres.

L'appareil répondant à cette définition n'est pas plus réalisable

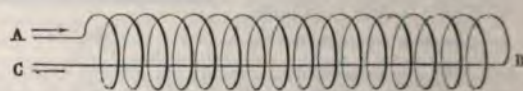


Fig. 874.

expérimentalement que ne l'est le *pendule simple* ; mais on construit, sous le nom de *cylindre électrodynamique*, un appareil qui est au solénoïde d'Ampère ce que le *pendule composé* est au *pendule simple*.

Il consiste en un système de courants hélicoïdaux, égaux et parallèles, formés d'un même fil de cuivre, recouvert de soie et replié sur lui-même en hélice (fig. 874), puis ramené suivant l'axe soit dans l'intérieur, soit à l'extérieur de l'hélice, de manière que le courant rectiligne soit exactement égal à la somme des projections des courants sinueux sur l'axe.

Ce système de courants hélicoïdaux est équivalent : 1° à un système de courants circulaires ayant même rayon que le cylindre directeur des spires et en nombre égal à celui des spires; 2° à un courant rectiligne ayant une longueur égale à la somme des pas de ces spires, c'est-à-dire à la longueur du cylindre directeur. Ce courant rectiligne étant détruit par la partie BC qui revient en sens inverse, il ne reste plus que le système de courants circulaires. D'autre part, on démontre qu'un système de courants circulaires de rayon fini est équivalent à un faisceau de courants circulaires infiniment petits, tous parallèles et tous de même sens.

Par conséquent, un cylindre électrodynamique est équivalent à un faisceau de solénoïdes, de même qu'un pendule composé est équivalent à un faisceau de pendules simples. C'est pourquoi l'on donne communément le nom de *solénoïde* au cylindre électrodynamique.

962. **Action des courants sur les solénoïdes.** — Les lois expérimentales relatives à l'action des courants rectilignes fixes sur les courants finis, rectangulaires ou circulaires, s'appliquent évidemment à chacune des spires d'un cylindre électro-dynamique. Il en résulte qu'*un courant rectiligne tend à diriger ces circuits parallèlement à lui-même.*

On constate ce fait à l'aide d'un solénoïde construit de manière à pouvoir être rendu très mobile autour d'un axe vertical (fig. 875). Si l'on place en dessous

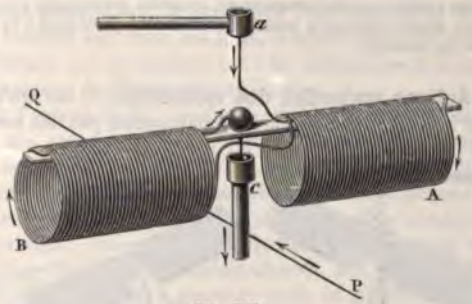


Fig. 875.

parallèlement à son axe, un fil rectiligne PQ, traversé par un courant qui passe en même temps dans les fils du solénoïde, on voit celui-ci *tourner et se mettre en croix avec le courant.* Dans cette position d'équilibre, ses spires se trouvent parallèles au courant fixe, et de plus, dans la partie inférieure de chacune d'elles, le courant est de même sens que dans le fil rectiligne.

Si l'on place le courant rectiligne verticalement sur le côté, on observe soit une attraction, soit une répulsion, suivant que, dans le fil vertical et dans la partie du solénoïde la plus voisine, les deux courants sont de même sens ou de sens contraires.

963. **Action directrice de la terre sur les solénoïdes.** — *La terre agit sur les solénoïdes comme sur les courants fermés ou sur les aimants.*

En effet, si l'on pose le solénoïde à suspension sur son support (fig. 840) et qu'on le dirige d'abord hors du méridien magnétique, on observe que l'appareil, dès qu'on y lance un courant assez énergique, se met en mouvement, puis s'arrête dans une certaine position d'équilibre : il a alors une direction

telle, que son axe est parallèle à l'aiguille de déclinaison. De plus, dans la partie inférieure de ses spires, le courant est dirigé de l'est à l'ouest.

Le solénoïde se dirige donc sous l'influence du magnétisme terrestre comme une aiguille aimantée; on est donc fondé à nommer *pôle nord*, de même que dans les aimants, l'extrémité qui se dirige vers le nord, et *pôle sud* celle qui se dirige vers le sud.

964. **Actions mutuelles des aimants et des solénoïdes.** — On observe entre les solénoïdes et les aimants les mêmes phénomènes d'attraction et de répulsion qu'entre les aimants.

En effet, si l'on présente à un solénoïde mobile, parcouru par un courant, l'un des pôles d'un fort barreau aimanté, il y a répulsion ou attraction, suivant que les pôles de l'aimant et du solénoïde mis en présence sont de même nom ou de noms contraires. *Réciproquement*, le même phénomène a lieu si l'on présente à une aiguille aimantée mobile un solénoïde qu'on tient à la main, et parcouru par un courant.

965. **Actions mutuelles des solénoïdes.** — Lorsqu'on fait agir l'un sur l'autre deux solénoïdes parcourus par un courant assez

Fig. 876.

intense, l'un qu'on tient à la main, l'autre mobile autour d'un axe vertical (fig. 876), on observe, entre les extrémités de ces deux solénoïdes, des phénomènes d'attraction et de répulsion identiques à ceux que présentent entre eux les pôles des aimants; ces phénomènes peuvent se prévoir d'après la direction relative des courants dans les extrémités mises en présence.

966. **Expériences de Weber. — Moment magnétique d'une bobine.** — Weber a démontré, au moyen d'expériences analogues à celles de Gauss, que l'on peut

substituer à un aimant quelconque de moment M une bobine recouverte de n spires dont la surface totale est égale à S, si l'on fait passer dans la bobine un courant I, tel que l'on ait $SI = M$. Le produit SI de la surface totale d'une bobine par l'intensité électromagnétique du courant qui la traverse a été appelé *moment magnétique* de la bobine. C'est le moment de l'aimant qui serait équivalent à la bobine, au point de vue des actions électromagnétiques extérieures. On peut, par la méthode de Gauss, déterminer le produit SI.H et le rapport $\frac{SI}{H}$, et par suite SI et H. Il résulte de là que le moment du couple directeur exercé par la terre sur un cadre mobile autour d'un axe vertical est égal à SIH. On a vu d'autre part comment la loi des réactions électromagnétiques permet de calculer ce couple. On peut l'évaluer soit par la méthode des oscillations, soit en l'équilibrant au moyen d'un couple de torsion capable de maintenir la spire dans le plan du méridien.

967. Théorie d'Ampère sur le magnétisme. — L'ensemble de ces expériences prouve que les solénoïdes se comportent exactement comme des aimants, et paraissent constitués de la même manière. Se fondant sur tous ces faits, Ampère imagina une théorie du magnétisme qui fit rentrer tous les phénomènes magnétiques dans le domaine de l'Électrodynamique.

Il admit l'existence de courants circulaires autour de chaque particule des substances magnétiques. Quand ces substances ne sont pas aimantées, leurs courants particulaires sont enchevêtrés dans toutes les directions, et la résultante de leurs actions électrodynamiques est nulle; mais, sous l'influence d'un aimant ou d'un courant puissant, ces courants s'orientent et prennent une certaine position d'équilibre, conformément aux lois de l'électrodynamique; ils sont alors orientés dans le même sens et dans des plans perpendiculaires à des lignes qui contiennent leurs centres et sont symétriquement disposés autour de l'axe du barreau qu'on aimante, en sorte que celui-ci devient un véritable *faisceau de solénoïdes*, dont l'ensemble agit comme un solénoïde unique.

968. **Différence entre les solénoïdes et les aimants.** — Entre les solénoïdes et les aimants il existe une différence : c'est que dans les premiers les pôles sont *aux extrémités mêmes*, tandis que dans les aimants ils sont, comme nous l'avons vu, *à une certaine distance des extrémités*, distance qui augmente avec le diamètre des barreaux.

Cette différence n'est pas en contradiction avec la théorie d'Ampère. En effet, en calculant la position des pôles d'un solénoïde unique, on trouve qu'ils doivent être placés *rigoureusement à chaque extrémité*. Or un barreau aimanté n'est pas un solénoïde unique, mais un faisceau de solénoïdes. Ces solénoïdes élémentaires sont rectilignes dans la partie centrale du barreau, tandis que près de la surface, surtout à leurs pôles, ils se courbent en présentant leur convexité vers l'axe du barreau. Leurs pôles se rapprochent ainsi de la section médiane de l'aimant, et il en est de même des pôles de l'aimant, qui ne sont autre chose que les points d'application de la résultante des forces appliquées à tous les

pôles des solénoïdes élémentaires : chacun de ces solénoïdes correspond à un filet magnétique solénoïdal défini ci-dessus.

969. **Direction des courants d'Ampère dans les aimants.** — Il est possible de reconnaître dans quel sens sont dirigés les courants d'Ampère dans les aimants. Considérons, en effet, un solénoïde mobile, parcouru par un courant (fig. 875). Lorsqu'il s'est placé en équilibre dans le méridien magnétique, son pôle nord A est dirigé vers le nord. D'après l'action directrice que la terre exerce sur les courants fermés, le courant, dans la partie inférieure de chaque spire, est dirigé de l'est à l'ouest, ou, ce qui revient au même, de gauche à droite pour l'observateur qui, placé dans le prolongement de l'axe du solénoïde, en regarde le pôle nord. Si l'on regarde le pôle sud, c'est l'inverse qui a lieu : le courant, dans la partie inférieure de chaque spire, est alors dirigé de droite à gauche.

Par conséquent, *si l'on se place en face du pôle sud d'un aimant, les courants d'Ampère paraissent dirigés dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre, et en sens contraire si l'on se place en face du pôle nord.*

970. **Courant terrestre.** — Pour expliquer le *magnétisme terrestre*, Ampère a admis l'existence de courants électriques circulant autour du globe, de l'est à l'ouest, perpendiculairement, en chaque lieu, au méridien magnétique. Ces courants, en ajoutant leurs effets, équivaudraient à un courant résultant unique, qui serait dirigé de l'est à l'ouest et parcourrait l'équateur magnétique. Quant à leur origine, ce seraient des courants thermo-électriques, dus aux variations de température qui résultent de l'action successive du soleil sur les différents points de la surface du globe par suite du mouvement diurne.

Ce seraient ces courants qui dirigent les aiguilles des boussoles et des solénoïdes, et qui agissent sur les courants horizontaux et verticaux.

L'hypothèse du courant terrestre est parfaitement conforme aux lois expérimentales de l'action de la terre sur les courants.

APPLICATION DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME.

SYSTÈME DES UNITÉS ÉLECTRIQUES ABSOLUES C. G. S.

971. **Définitions.** — Gauss eut le premier l'idée de substituer aux unités arbitraires, dans la mesure des grandeurs électriques et magnétiques, un système d'unités *absolues*, c'est-à-dire ne dépendant que d'un petit nombre d'unités fondamentales. Ces unités fondamentales, dites *unités absolues*, ont pu être réduites à trois : une unité de *temps*, la *seconde* ; une unité de *longueur*, le *centimètre* ; et une unité de masse mécanique, la *masse du gramme*. Ce sont les unités dites C. G. S.

Il y a quatre grandeurs électriques principales : la quantité d'électricité Q, l'intensité du courant I, la force électromotrice des piles E, et la résistance

des conducteurs R. Or entre ces quantités il existe trois équations qui sont les expressions de trois lois physiques :

[1] $Q = It,$ (Définition de I)

[2] $I = \frac{E}{R},$ (Loi d'Ohm)

[3] $W = I^2 Rt.$ (Loi de Joule)

(Dans ces équations t représente le temps et W représente le travail.) On peut donc exprimer trois de ces grandeurs en fonction de la quatrième, et il suffira d'avoir une relation entre l'une d'elles et l'unité absolue pour pouvoir évaluer toutes les grandeurs électriques en unités absolues. L'ensemble de ces mesures constituera un *système d'unités électriques absolues.*

Il n'existe pas de relation *directe* entre une des grandeurs électriques et les grandeurs qu'on a prises pour unités absolues, c'est-à-dire le temps, l'espace et la masse mécanique; mais il existe de nombreuses relations entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques. Ainsi la loi de Coulomb et les lois d'Ampère lient la force mécanique soit à la *masse électrique*, soit à l'*intensité électrique*. Or, comme on peut exprimer la force en fonction de la masse *mécanique* et de l'accélération, on voit qu'on peut, en définitive, évaluer les grandeurs électriques en unités absolues de C. G. S.

Si l'on choisit la loi de Coulomb pour rattacher les grandeurs électriques aux unités absolues, on constituera le système d'unités électriques absolues appelé *système électrostatique*. Si l'on choisit la loi des actions électrodynamiques exprimée par la *formule d'Ampère*, on constituera le *système électrodynamique*. Enfin, si l'on choisit la loi des actions électromagnétiques exprimée par la *formule de Laplace*, on constituera le *système électromagnétique* des unités électriques absolues.

C'est ce dernier système qui fut proposé dès 1852 par l'Association Britannique pour l'avancement des sciences, qui fut adopté en 1865 par la Société Royale de Londres et qui a été précisé et définitivement consacré en 1881 par le Congrès des Électriciens.

972. **Unités absolues C. G. S. électromagnétiques.** — Ce système d'unités est défini par la formule de Laplace, laquelle rattache les grandeurs électriques et magnétiques aux grandeurs mécaniques.

1° *Unité de magnétisme.* — C'est la quantité de magnétisme qui exerce sur une quantité égale, placée à 1 centimètre, une force égale à une dyne.

Soit Q cette unité. On a, d'après la loi de Coulomb (en représentant par F et par L les unités absolues de force et de longueur),

$$F = \frac{Q^2}{L^2};$$

d'où l'on tire $Q = L\sqrt{F}$.

En remplaçant F par sa dimension, on aura

$$Q = \frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}}}{T}.$$

Telle est la *dimension* de l'unité de magnétisme.

2° *Unité de champ magnétique.* — C'est le champ magnétique dans lequel l'unité de magnétisme subit une attraction ou une répulsion égale à une dyne.

Soit H cette unité. On a, d'après la loi de Coulomb, $F = HQ$; d'où l'on tire

$$H = \frac{F}{Q}.$$

En remplaçant F et Q par leurs dimensions, on aura la dimension du champ magnétique. Elle est

$$H = \frac{M^{\frac{1}{2}}}{L^{\frac{1}{2}}}.$$

3° *Unité de moment magnétique.* — C'est le moment d'un aimant de longueur égale à 1 centimètre et dont les pôles renferment chacun l'unité de magnétisme. Soit J cette unité. On a par définition $J = QL$. En remplaçant Q et L par leurs dimensions, on a la dimension de J. Elle est

$$J = \frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}}}{T}.$$

4° *Unité d'intensité de courant.* — C'est un courant d'intensité telle, qu'une longueur de 1 centimètre de ce courant, décrivant un cercle de rayon égal à 1 centimètre, exerce au centre de ce cercle, sur l'unité de magnétisme, une force égale à une dyne.

Soit I la dimension, on a

$$I = \frac{F}{HL} = \frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}}{T}.$$

5° *Unité de quantité d'électricité.* — C'est la quantité d'électricité qui traverse en 1 seconde la section d'un conducteur parcouru par l'unité du courant.

$$\text{Dimension} = A = IT = M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}.$$

6° *Unité de résistance.* — C'est celle d'un conducteur dans lequel l'unité de courant dépense (sous forme de chaleur) un erg dans 1 seconde.

$$\text{Dimension} = R = \frac{W}{I^2 T} = \frac{L}{T}.$$ Il faut remarquer que *cette dimension est la même que celle de la vitesse.*

7° *Unité de force électromotrice ou de différence de potentiel.* — C'est celle qui communique l'unité d'énergie à l'unité d'électricité.

$$\text{Dimension} = E = IR = \frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}}}{T^2}.$$

8° *Unité de capacité.* — C'est celle d'un condensateur dont les armatures seraient chargées de l'unité d'électricité pour une différence de potentiel égale à l'unité.

$$\text{Dimension} = C = \frac{A}{E} = \frac{T^2}{L}.$$

973. **Unités électromagnétiques secondaires.** — Plusieurs de ces unités absolues seraient d'un usage peu commode dans la pratique : elles seraient en beaucoup trop grandes ou beaucoup trop petites par rapport aux grandeurs lectriques qu'on est appelé ordinairement à mesurer. Aussi leur a-t-on sub

stitué dans la pratique des unités secondaires qui en sont des multiples ou des sous-multiples[1].

1° *Unité secondaire d'intensité de courant.* — Elle est égale à $\frac{1}{10}$ d'unité absolue ; on l'appelle *ampère*.

Un galvanomètre à une seule aiguille, d'une sensibilité médiocre, peut être gradué en milliampères.

2° *Unité secondaire de quantité d'électricité.* — Elle est égale à $\frac{1}{10}$ d'unité absolue ; on l'appelle *coulomb*.

D'après M. Mascart, l'unité absolue d'électricité est capable de décomposer 0,9575 mmg d'eau en une seconde.

3° *Unité secondaire de résistance.* — Elle est égale à 10^9 unités absolues : on l'appelle *ohm*.

Nous avons vu que cette unité secondaire a été réalisée matériellement, c'est-à-dire qu'on a pu construire un *ohm-étalon*, comme on a construit un mètre-étalon.

Le Congrès des Électriciens ayant décidé qu'on établirait l'étalon de résistance en colonne de mercure à 0°, de section égale à 1 m², des expériences précises ont démontré que la longueur de cette colonne est sensiblement égale à 106 cm.

L'*ohm-étalon* qui avait été précédemment déterminé par l'Association Britannique, est trop faible : il diffère d'environ 0,010 de l'ohm théorique.

L'*unité de résistance Siemens* (qui n'est pas autre chose que l'ancienne unité de Pouillet) vaut environ 0,943 de l'ohm théorique.

Il faut environ 50 m d'un fil de cuivre de 1 mm de diamètre pour faire un ohm.

L'ancienne unité de résistance des télégraphes français, qui était de 1 kilomètre de fil de fer de 4 mm de diamètre, vaut environ 10 ohms.

Un élément Bunsen de dimension moyenne a une résistance d'environ 0,15 ohm et un élément Becquerel de dimension moyenne une résistance de 0,85 ohm.

4° *Unité secondaire de force électromotrice ou de différence de potentiel.* — Elle est égale à 10^8 unités absolues : on l'appelle *volt*.

Un élément Volta ordinaire, formé de zinc, cuivre et sulfate de zinc, a une force électromotrice sensiblement égale à 1 volt.

Un élément Becquerel formé de cuivre, sulfate de cuivre, sulfate de zinc et zinc amalgamé a une force électromotrice qui varie entre 1,09 et 1,14 volt.

La force électromotrice de l'élément Latimer Clark, l'un des plus constants des éléments voltaïques, a pour valeur 1,437 volt.

5° *Unité secondaire de capacité électrique.* — Elle est égale à $\frac{1}{10^9}$ d'unité absolue : on l'appelle *farad*.

D'après la formule fondamentale des condensateurs $Q = CV$, on voit qu'un condensateur de 1 farad se charge d'*un coulomb* sur chacune de ses armatures pour une différence de potentiel d'*un volt*.

Remarque. — L'unité absolue de capacité électromagnétique est énorme.

Le farad lui-même est une unité trop grande dans la pratique. On construit pour les mesures de capacité électriques des *condensateurs-étalons* donnant le microfarad et les sous-multiples du microfarad.

Une batterie électrique de 10 jarres, ayant un développement en surface de 1 m² et un verre d'une épaisseur de 1 mm, a une capacité de $\frac{1}{55}$ de microfarad.

1. Nous avons défini précédemment ces unités pratiques, à mesure que l'emploi en devenait nécessaire. Nous résumons ici, pour plus de clarté, ces définitions dans un même paragraphe.

CHAPITRE VII

EFFETS PHYSIQUES DES COURANTS.

—

AIMANTATION PAR LES COURANTS, ÉLECTRO-AIMANTS.

974. **Aimantation par les courants.** — D'après l'influence que les courants exercent sur les aimants, il est naturel de penser qu'ils agiront aussi sur les substances magnétiques de manière à les aimanter en orientant les courants d'Ampère. Arago découvrit, en effet, qu'en plongeant un fil de fer parcouru par un courant dans de la limaille de fer, celle-ci s'y attache abondamment, et qu'elle retombe aussitôt que le courant cesse, tandis que l'action est nulle sur la limaille de tout autre métal non magnétique.

L'action des courants sur les substances magnétiques est surtout sensible quand on emploie le procédé d'Ampère. On enroule en hélice un fil de cuivre autour d'un tube de verre, et l'on place dans celui-ci un barreau d'acier non aimanté. Il suffit alors qu'un courant traverse le fil, même instantanément, pour que le barreau soit fortement aimanté.

Si, au lieu d'un courant de pile, on fait passer dans le fil la décharge d'une bouteille de Leyde, on trouve encore que le barreau est aimanté.

975. **Procédé d'aimantation.** — 1° *Cas de l'acier.* — On place

Fig. 877.

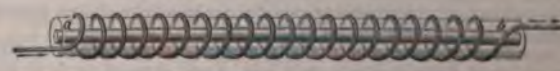


Fig. 878.

en général le barreau d'acier dans l'axe d'un tube de verre sur lequel on enroule le fil conducteur du courant. L'enroulement du fil peut avoir lieu de gauche à droite en dessus, et alors on

une *hélice dextrorsum* (fig. 877) ; s'il se fait de gauche à droite en dessous, on a une *hélice sinistrorsum* (fig. 878). Dans la première, le pôle sud du barreau est toujours à l'extrémité par laquelle entre le courant : c'est le contraire qui a lieu dans l'hélice sinistrorsum.

Du reste, pour aimanter un barreau d'acier à l'aide d'un courant, il n'est pas nécessaire de le placer dans un tube. Il suffit de l'entourer, sur toute sa longueur, avec les spires d'un fil de cuivre isolé, puis d'y faire passer le courant.

Un barreau d'acier acquiert ainsi, sous l'influence d'un courant assez puissant, une intensité d'aimantation très grande, laquelle persiste après le passage du courant, en décroissant toutefois lentement jusqu'à ce que le barreau arrive à un état de saturation stable.

2° *Cas du fer doux.* — Si dans les hélices ci-dessus on place un barreau de fer doux, dès qu'un courant parcourt le fil, le barreau s'aimante fortement et reste aimanté tout le temps que le courant passe ; mais, aussitôt que le courant est interrompu, toute aimantation disparait : ce qui provient de ce que la force coercitive du fer doux est nulle. Toutefois, si le fer n'est pas parfaitement doux, c'est-à-dire pur, il conserve des traces d'aimantation.

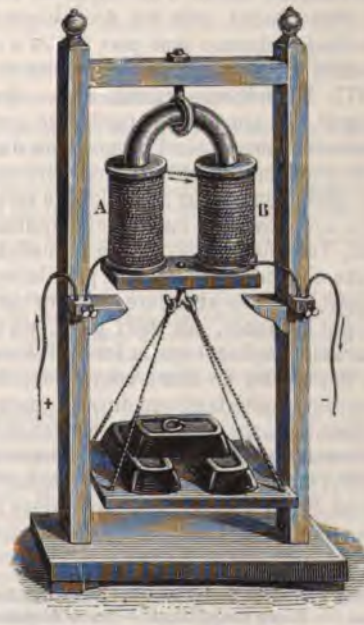


Fig. 879.

976. **Électro-aimants.** — On nomme *électro-aimants* des barreaux de fer doux sur lesquels on a roulé un grand nombre de fois, en hélices superposées, un fil de cuivre bien isolé. Ces hélices superposées sont alternativement dextrorsum et sinistrorsum ; mais, comme le courant s'y propage en sens contraires de deux en deux, leurs effets s'ajoutent pour

développer respectivement un pôle nord à une extrémité de la bobine magnétisante et un pôle sud à l'autre.

Lorsque les électro-aimants sont rectilignes, on enroule le fil soit dans toute la longueur des barreaux, soit aux extrémités seulement, en deux bobines distinctes, le fil allant de l'une à l'autre et s'enroulant dans le même sens. Lorsque les barreaux sont recourbés en fer à cheval (fig. 879), on enroule le fil seulement sur les deux branches, en deux bobines A et B, et l'on passe d'une branche à l'autre, comme l'indique la figure, de manière que chaque bobine soit la continuation de l'autre : c'est à cette condition qu'il se forme aux extrémités deux pôles de noms contraires

On construit aussi des électro-aimants de trois pièces : deux bobines, l'une dextrorsum, l'autre sinistrorsum, sont enroulées chacune autour d'un noyau de fer doux, et une armature de même métal relie les deux noyaux à l'aide de fortes vis. Ces électro-aimants sont plus faciles à construire que les électro-aimants d'une seule pièce et ils sont tout aussi puissants.

977. **Magnétisme rémanent.** — On nomme *magnétisme rémanent* une aimantation faible que conserve souvent le fer des électro-aimants après l'interruption du courant.

Ce phénomène s'observe ordinairement dans un fer qui n'est pas parfaitement pur ; car alors le métal est doué d'une certaine force coercitive, qui retient l'aimantation après le passage du courant. Toutefois le magnétisme rémanent se manifeste aussi dans le cas d'un fer parfaitement pur, lorsque l'électro-aimant est en contact avec son armature. Dans ce cas, l'armature étant aimantée par influence, ses deux pôles, au moment de la rupture du courant, réagissent sur le fer de l'électro-aimant pour y maintenir deux pôles de noms contraires : de là une aimantation qui persiste ensuite tant que dure le contact, et cesse avec lui.

Dans les appareils où des électro-aimants agissent par intermittence sur leur armature, le magnétisme rémanent empêche celle-ci de se détacher. Il en résulte un fonctionnement irrégulier, qu'on évite en interposant une mince feuille, soit de papier, soit d'une autre substance inerte, entre les électro-aimants et leurs armatures.

978. **Définitions fondamentales : Perméabilité magnétique. — Induction spécifique. — Champ magnétisant. — Force magnétomotrice. — Réluctance. — Circuit magnétique. — Ampère-tour. — Hystérésis.** — Considérons une bobine infiniment longue, portant n spires par centimètre; on démontre que, pour un courant d'intensité I, circulant dans la bobine, le champ magnétique produit a pour intensité $4\pi nI$ et qu'il est dirigé parallèlement à l'axe de la bobine.

Perméabilité magnétique. — Introduisons dans la bobine un cylindre de même diamètre, d'une substance magnétique, et soit Φ, le flux qui traverse s

section S. Avant l'introduction du cylindre ce flux avait pour valeur

$$\Phi_0 = 4\pi n I S; \qquad \text{il devient ensuite} \qquad \Phi_1 = 4\pi n I S \mu; \qquad [1]$$

le coefficient μ se nomme *perméabilité* magnétique de la substance.

Induction spécifique et champ magnétisant. — On peut écrire

$$[1] \qquad 4\pi n I = \frac{\Phi_1}{S} \cdot \frac{1}{\mu}.$$

On nomme *induction spécifique* le rapport $\frac{\Phi_1}{S}$ et on le désigne ordinairement par la lettre B. $4\pi n I$ est le *champ magnétisant*. On le désigne par H.

Force magnétomotrice et réluctance. — Si l est la longueur du cylindre introduit, on a

$$N = nl,$$

N étant le nombre de tours du circuit qui recouvre la longueur l; on peut donc écrire la relation [1]

$$[2] \qquad 4\pi N I = \frac{1}{\mu} \frac{l}{S} \cdot \Phi_1;$$

le produit $4\pi N I$ est appelé *force magnétomotrice* du flux Φ_1 dans le cylindre.

$\frac{1}{\mu} \frac{l}{S}$ est la *résistance magnétique*, ou *réluctance*, du cylindre.

Circuit magnétique. — Si on assimile le flux Φ_1 à l'intensité d'un courant électrique, la perméabilité μ à la conductibitité spécifique et la force magnétomotrice à la force électromotrice, on voit que la formule [2] est analogue à celle qui exprime la loi d'Ohm. Pour compléter ce parallélisme, on appelle *circuit magnétique* le chemin suivi par le flux Φ_1. La resistance des milieux qui le constituent est égale à $\Sigma \frac{1}{\mu} \frac{l}{S}$ et la force magnétomotrice du flux a pour valeur $\Sigma 4\pi N I$.

Ampère-tour. — Si I est exprimé en ampères, le produit NI se nomme *ampère-tour*. La force magnétomotrice est exclusivement fonction des ampères-tours.

Si on connait μ, l, S et le flux Φ_1 à produire, la formule [2] fait connaître le nombre d'ampères-tours qu'il est nécessaire d'employer. Une seule spire parcourue par un courant de 20 ampères produit le même flux que 20 tours pour un courant de 1 ampère.

Hystérésis ou *retard à l'aimantation.* — La valeur de μ est variable avec le champ magnétisant H : elle est donnée par des courbes ou des tables obtenues expérimentalement. Il y a plus : l'induction n'a pas la même valeur pour une même valeur de H selon que l'on établit celle-ci par l'augmentation ou par la diminution du champ magnétisant. En allant de $-H$ à $+H$ et revenant à $-H$, on obtient donc un cycle d'aimantation; l'induction spécifique $\mathfrak{B}$ a une valeur plus grande pour une même valeur du champ magnétisant en allant de $+H$ à $-H$ que dans la marche contraire. Ewing a donné à ce phénomène le nom d'*hystérésis* ou de *retard à l'aimantation*. Il est corrélatif d'une perte d'énergie.

979. **Calcul d'un électro-aimant.** — On peut calculer, à l'aide de la formule [2], des électro-aimants devant satisfaire à des conditions données et à celui des machines dynamos. Par exemple, si on veut produire une induction spécifique B imposée à l'avance dans un noyau de section S, de perméabilité μ et de longueur l, il faudra lui donner un nombre d'ampères-tours NI indiqué par *l'équation*

$$NI = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{\mu} \frac{l}{S} BS = \frac{Bl}{4\pi\mu}.$$

Si on donne la force portante Mg, on devra d'abord calculer l'induction spécifique correspondante B par la relation

$$Mg = \frac{B^2 S}{8\pi}.$$ [1]

980. **Substances diamagnétiques et substances paramagnétiques.** — La distinction entre les substances paramagnétiques et diamagnétiques ne fut nettement établie que par Faraday, en 1847, à l'aide de ses puissants électro-aimants.

Il donna le nom de *direction axiale* à la droite qui joint les deux pôles de l'électro-aimant, et celui de *direction équatoriale* à celle qui est perpendiculaire à la même ligne. Il a reconnu que le nombre des substances diamagnétiques est beaucoup plus grand que celui des substances magnétiques.

Les substances diamagnétiques sont le bismuth, le plomb, l'antimoine, le zinc, le cuivre, le cristal de roche, le verre, le sel marin, le plâtre, le charbon le soufre, et en général les substances organiques, comme les résines, le sucre, le bois, la chair des animaux. Les substances magnétiques sont le fer, le nickel, le cobalt, le chrome et la plupart des métaux. On peut admettre aujourd'hui qu'il n'est pas une seule substance sur laquelle n'agissent, dans un sens ou dans l'autre, les aimants puissants.

CHAPITRE VIII

MESURE DE L'INTENSITÉ DES COURANTS. — GALVANOMÈTRES ET BOUSSOLES.

981. **Méthodes et instruments de mesure.** — 1° *Méthode électrochimique.* — Nous avons indiqué une première méthode de mesure, due à Davy. Elle est fondée sur la comparaison des effets chimiques des courants. Lorsqu'un courant électrique traverse un composé binaire ou ternaire, on sait qu'il le décompose en ses éléments : les éléments électronégatifs se déposent à l'électrode *positive*, tandis que l'élément électropositif se dépose à l'électrode *négative*. Dans l'un et l'autre cas, la quantité de l'électrolyte décomposée par un même courant est, — toutes choses égales d'ailleurs, — *proportionnelle à la quantité d'électricité* qui traverse l'électrolyte.

Or l'intensité d'un courant est définie par la quantité d'électricité qui passe, dans l'unité de temps, par une section quelconque du circuit. L'expérience ayant démontré que le poids d'hydrogène dégagé, dans un voltamètre à eau, est proportionnel à cette

1. Voir J. Joubert, Traité élémentaire d'électricité.

quantité d'électricité, on doit en conclure que *l'intensité d'un courant est proportionnelle au poids* d'hydrogène qu'il dégage ou *au poids* de tout autre électrolyte qu'il précipite *en une seconde*.

Application de la méthode électrochimique. — Appelons e l'équivalent en poids de l'élément déposé, rapporté à l'hydrogène et *exprimé en grammes* : on sait qu'un coulomb libère un poids $p_1 = \frac{e}{96600}$ de ce corps.

Supposons qu'on fasse passer le courant inconnu, pendant t secondes, dans cet électrolyte et soit p le poids déposé. Le nombre de coulombs Q qui correspondent au poids p est donné par la formule

$$Q = \frac{p}{p_1} = \frac{96600\,p}{e}.$$

On a d'ailleurs, entre l'intensité i cherchée et la quantité Q, la relation de définition

$$Q = it, \qquad \text{d'où} \qquad i = \frac{96600\,p}{et}.$$

Remarque. — 1° On pourrait employer le voltamètre à eau pour faire ces mesures; mais comme les éléments de l'eau sont gazeux et difficiles à recueillir, il est préférable de prendre comme électrolyte une solution d'un sel métallique, comme le sulfate de cuivre ou l'azotate d'argent : le métal déposé pendant un certain temps est alors facile à peser.

1 coulomb dépose : 0,00033 g de cuivre, 0,001118 g d'argent, 0,00034 g de zinc.

Le volume d'hydrogène dégagé par un coulomb, mesuré à 0° et 76 cm de pression, occupe un volume de 0,1155 centimètre cube.

2° *Coulombmètre d'Edison.* — En réalité, la mesure fait simplement connaître l'intensité moyenne du courant, elle n'indique pas ses variations.

Cette méthode a été appliquée par Edison à la construction d'un *compteur électrochimique* de quantité d'électricité ou *coulombmètre*.

2° *Méthode électromagnétique.* — Une deuxième méthode de mesure, plus commode que la précédente, est fondée sur la comparaison des effets électromagnétiques des courants. On l'applique à l'aide d'instruments spéciaux appelés *galvanomètres* et *boussoles*. Le courant électrique passe dans l'instrument, où il agit sur une aiguille aimantée qui est déviée plus ou moins. Le sens de la déviation dépend du sens du courant, et la grandeur de la déviation est une fonction de l'intensité.

Pour les galvanomètres dits *relatifs*, cette fonction est très compliquée : on est obligé de la déterminer expérimentalement. C'est au moyen d'une *formule empirique*, ou, ce qui est la même chose, d'une *table de graduation*, qu'on déduit l'intensité I de la déviation observée α. En général, les galvanomètres de ce genre ne sont employés que dans des mesures relatives : on ne leur demande alors que de la *sensibilité*.

Pour les galvanomètres dits *absolus* ou *boussoles*, qui conviennent seuls aux mesures absolues, la déviation de l'aiguille est une fonction ds l'intensité qu'on peut calculer.

982. **Galvanomètre ordinaire.** — 1° *Principe.* — Le *galvanomètre*, connu aussi sous les noms de *multiplicateur* et de *rhéomètre*, fut construit par Schweigger, comme application de la découverte d'Œrsted. Par la déviation que le courant imprime à une aiguille aimantée, il décèle l'existence des courants, par le sens de la déviation il en fait connaître la direction, et par l'angle d'écart il en mesure l'intensité.

2° *Construction.* — L'action directrice de la terre, qui tend à maintenir l'aiguille aimantée dans le méridien magnétique, est une force antagoniste qui diminue la déviation de l'aiguille. Il importe donc à la fois de multiplier l'action des courants et de diminuer celle de la terre.

Multiplicateur de Schweigger. — Schweigger eut l'idée de replier

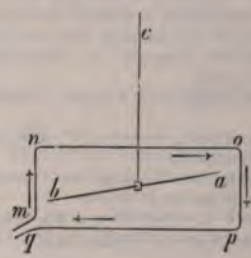


Fig. 880.

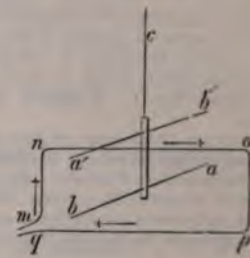


Fig. 881.

plusieurs fois le fil conducteur du courant de manière à former un circuit multiple, rectangulaire et vertical, au centre duquel l'aiguille est suspendue par un fil de cocon (fig. 800). Si l'on applique la règle d'Ampère à ce cas, on reconnaît facilement que, lorsqu'un courant parcourt le circuit *mnopq*, les quatre parties *mn*, *no*, *op* et *pq* agissent dans le même sens pour faire dévier le pôle *a* en arrière du plan *mnop*, et le pôle *b* en avant. En enroulant le fil dans le plan vertical de l'aiguille, on a donc *multiplié* l'action du courant : de là le nom de *multiplicateur* donné à cet appareil. Cette multiplication ne peut augmenter avec le nombre des tours que *jusqu'à une certaine limite*; car, d'une part l'intensité du courant s'affaiblit à mesure qu'on augmente la longueur et, par suite, la résistance du circuit qu'il parcourt; et, d'autre

part, l'action des spires diminue à mesure qu'elles s'éloignent de l'aiguille.

Aiguille astatique de Nobili. — Nobili fit agir le circuit, non sur une seule aiguille, mais sur un système astatique (778) de deux aiguilles (fig. 881), l'une intérieure et l'autre extérieure au fil, et liées invariablement l'une à l'autre. L'aiguille intérieure *ab* est influencée par le circuit *mnopq*, comme nous l'avons expliqué ci-dessus ; mais, pour *a'b'*, la partie *no* tend à ramener le pôle *a'* en avant, tandis que les trois portions *mn*, *op* et *pq* tendent à le pousser en arrière. C'est l'action de *no* qui prédomine, à cause de sa distance moindre, de sorte que, en somme, l'effet du courant en est accru ; mais l'avantage principal du système astatique réside dans une diminution notable de l'action directrice de la terre. Si même le système était rigoureusement astatique il serait complètement soustrait à l'action terrestre et serait dévié de 90° sous l'influence des moindres courants. Dans la pratique, il faut que le système soit imparfaitement astatique, de manière que la terre exerce une action antagoniste, qui augmentant avec la déviation, finit par annuler l'action du courant dans un azimut α différent de 90°. D'ailleurs cette différence des aiguilles, pouvant être rendue aussi petite qu'on le veut, ne nuit pas à la sensibilité de l'instrument.

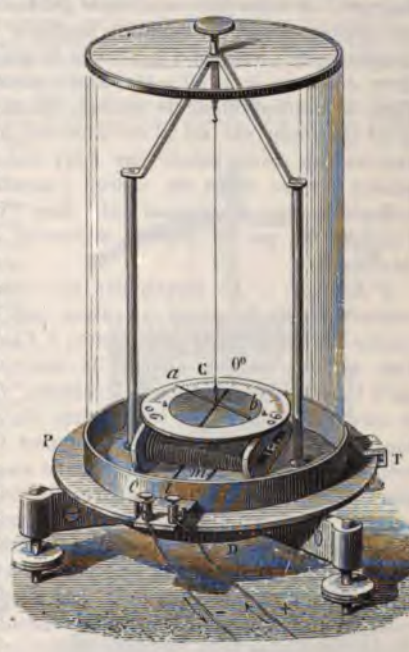


Fig. 882.

3° *Description* (modèle Ruhmkorff). — L'instrument (fig. 882) est enfermé dans une cage en verre, qui le soustrait aux agita-

tions de l'air ambiant, ainsi qu'à l'oxydation. Le pied est un disque épais D, de laiton, porté par trois vis calantes; au-dessus est un plateau tournant P, de même métal, sur lequel est fixé un cadre de cuivre rouge, d'une largeur presque égale à la longueur des aiguilles. Sur ce cadre s'enroule un grand nombre de fois un fil de cuivre rouge *m*, parfaitement isolé, dont les bouts arrivent à des bornes *i* et *o*, destinées à recevoir les rhéophores du courant. Le cadre porte un cercle gradué C, en cuivre rouge, qui est fendu suivant un diamètre parallèle à l'enroulement du fil; à cette fente correspond le zéro de la graduation, laquelle va des deux côtés de 0° à 90°. C'est par cette fente qu'on introduit dans le multiplicateur le système astatique des deux aiguilles: il est suspendu par un fil de coton fixé à une vis de rappel qui traverse un écrou monté sur deux colonnes parallèlement disposées sur les côtés du cadre. L'aiguille *a' b'*, principalement influencée par le courant est, dans l'intérieur du circuit, et l'aiguille *ab*, qui se déplace au-dessus du cercle, marque les déviations.

4° *Réglage*. — Au moyen des vis calantes, on commence par amener le fil de cocon à passer par le centre sans frotter contre les bords de la fente; puis, à l'aide de la vis de rappel, l'on soulève ou l'on abaisse le système astatique jusqu'à ce qu'il tourne librement dans le circuit. On oriente ensuite dans le méridien magnétique le diamètre du zéro. Pour cela, on fait tourner le plateau P sur son support D, jusqu'à ce que l'extrémité *a* de l'aiguille *ab* corresponde au zéro : les aiguilles sont alors parallèles aux fils du cadre. On fixe alors l'instrument en serrant, à l'aide d'une vis de pression, une pince T fixée au pied.

Remarques. — 1° A l'instant où le courant commence à passer, les aiguilles, brusquement écartées de leur position d'équilibre, tendent à faire plusieurs tours sur elles-mêmes. On évite cette rotation en fixant, en regard des divisions 90, deux petites bornes contre lesquelles bute l'aiguille supérieure.

2° On amortit les oscillations du système grâce à l'influence du cadran et du cadre de cuivre rouge. En effet, on verra que les oscillations de l'aiguille aimantée font naître dans ce métal des courants dits *d'induction* qui, réagissant sur elle, tendent à l'arrêter (*magnétisme d'Arago*).

3° Malgré les soins apportés dans la construction de cet appareil, plusieurs défauts en ont presque fait abandonner l'emploi, entre autres le faible amortissement de l'aiguille, l'absence de loi reliant les intensités aux déviations observées et les difficultés de sa graduation.

983. **Galvanomètres de Thomson.** — 1er *modèle.* — S. W. Thomson a construit, pour les mesures de précision des courants faibles, un galvanomètre à sensibilité variable qui diffère du précédent : 1° par le principe du système astatique ; 2° par la forme du multiplicateur.

Nous avons vu précédemment qu'on pouvait rendre une aiguille aimantée astatique en plaçant convenablement dans son voisinage un barreau aimanté. C'est le procédé employé par Thomson. L'aiguille aimantée est formée par plusieurs aiguilles solidaires de 5 à 6 millimètres de longueur (on obtient ainsi pour le même poids le plus grand moment magnétique) ; elle est suspendue par un ou plusieurs fils sans torsion au centre du multiplicateur. Celui-ci est renfermé dans une boîte cylindrique, sur laquelle se dresse une tige verticale : c'est sur cette tige qu'on peut déplacer et orienter le barreau directeur, de manière à affaiblir ou à renforcer l'action terrestre et faire varier ainsi l'astaticité de l'aiguille et la sensibilité de l'instrument.

Quant au multiplicateur (fig. 885), la forme en est assez compliquée, parce qu'elle a été calculée de manière à produire sur l'aiguille le *maximum d'effet spécifique* (effet par unité de longueur du fil).

2e *modèle.* — Dans un autre modèle (fig. 884), Thomson emploie un système astatique. Chacune des aiguilles est entourée d'un multiplicateur. Selon que le courant traverse les multiplicateurs en sens contraire ou dans le même sens, les actions qu'il exerce sur les aiguilles s'ajoutent ou s'opposent[1].

Les deux bobines principales B et B', dont les extrémités aboutissent aux bornes *b* par l'inter-

Fig. 885.

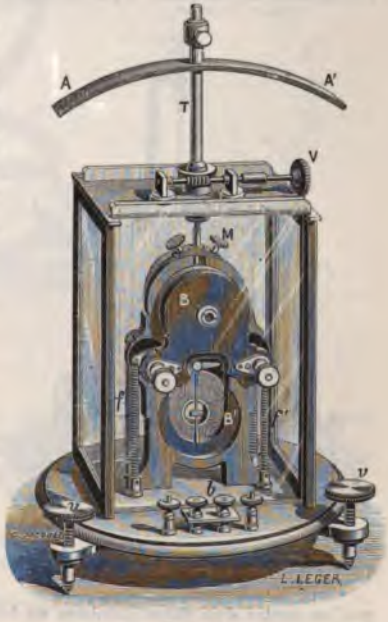


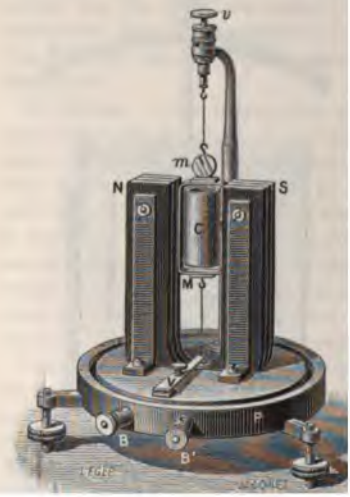
Fig. 884.

médiaire des fils enroulés en boudin *f*, *f'*, sont formées à leur tour par deux bobines appliquées l'une contre l'autre et fixées au bâti de l'appareil par des vis de serrage M. On peut effectuer le groupement de ces quatre bobines

1. *Dans ce dernier cas,* l'instrument est dit monté en différentiel.

neux) égales à 1 ou 2 cm sur une échell
lorsqu'il passe dans son circuit un cour
La résistance totale des bobines d'un 1
10 000 ohms.

984. **Galvanomètre apériodique Depre**
Deprez-d'Arsonval (fig. 885), l'organe mo
rectangulaire M, placé dans le champ d'



forces contraires se font équilibre. A ce moment l'aiguille aimantée reste en équilibre dans un azimut α.

2° *Équation d'équilibre.* — L'aiguille est très courte par rapport au rayon du cadre. Quand cette condition est remplie, on démontre à l'aide des formules d'Ampère[1] que les actions d'un courant qui circule dans le fil se réduisent à deux forces F, égales et contraires, appliquées aux deux pôles de l'aiguille et perpendiculaires au plan du cadre : on a

$$F = \mu H_1 \quad \text{avec} \quad H_1 = \frac{2\pi i}{R}$$

(μ étant la masse magnétique des pôles; i, l'intensité du courant; R, le rayon du cadre).

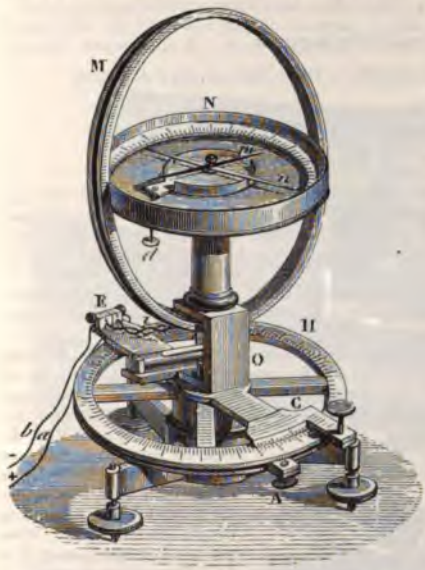


Fig. 886.

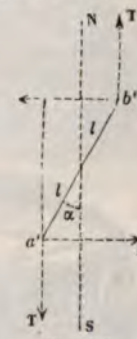


Fig. 887.

Soit $a'b'$ la position d'équilibre que prend l'aiguille sous les actions simultanées $(F_1 - F)$ et $(T_1 - T)$ du courant et de la terre (fig. 887).

Les moments de ces couples sont : $T.2l \sin\alpha$ et $F.2l \cos\alpha$. Il suffit d'exprimer que ces moments sont égaux et de signe contraire. On a

$$T.2l \sin\alpha - F.2l \cos\alpha = 0;$$

d'où, en remplaçant T par sa valeur μH (H étant la composante horizontale du champ terrestre) et F par sa valeur $n\mu H_1$ (n étant le nombre de tours de fil du circuit),

$$\mu H.2l \sin\alpha - n\mu H_1.2l \cos\alpha = 0;$$

d'où, en remarquant que l'on a $M = 2l\mu$ et $H_1 = \frac{2\pi i}{R}$,

$$\operatorname{tang}\alpha = \frac{2\pi n}{R}\frac{i}{H} \quad \text{ou encore} \quad i = H\frac{R}{2\pi n}\operatorname{tang}\alpha;$$

1. *Voir ce calcul dans les problèmes.*

$\frac{2\pi n}{R}$ est la *constante du galvanomètre* : c'est le champ produit au centre O par l'unité de courant traversant le cadre. En la désignant par g, on peut écrire enfin

$$i = \frac{H}{g} \operatorname{tang} \alpha :$$

telle est la formule de la boussole des tangentes.

Remarques. — 1° *Mesures relatives.* — Un second courant i' donnerait

$$i' = \frac{H}{g} \operatorname{tang} \alpha', \qquad \text{d où} \qquad \frac{i}{i'} = \frac{\operatorname{tang} \alpha}{\operatorname{tang} \alpha'}.$$

Cette équation d'équilibre suppose que l'action électromagnétique du courant est restée perpendiculaire au cadre, c'est-à-dire au méridien magnétique, quoique l'aiguille soit sortie de ce plan. Cette hypothèse est légitime si l'angle α est très petit et si le rayon du cadre est très grand par rapport à l'aiguille : d'où la nécessité d'avoir une aiguille *courte* et un *large* cadre.

986. **Ampèremètres. — Type Deprez-Carpentier.** — Les galvanomètres industriels se nomment *ampèremètres*. On les gradue par comparaison avec un galvanomètre servant d'étalon.

Celui de MM. Deprez et Carpentier (fig. 888) comprend un aimant mobile, placé à l'intérieur des bobines B et B', disposées en série, et orienté par un double aimant recourbé NN fixe. L'axe de la bobine BB' est incliné sur la ligne des pôles du double aimant, et le courant y est dirigé de manière à ramener l'aiguille parallèlement aux spires du fil. Le couple déviant croît alors, comme le couple directeur, avec l'angle de l'aiguille, et il y a *sensiblement* proportionnalité entre celui-ci et le courant. Une aiguille légère a, solidaire de l'aimant intérieur, se déplace vis-à-vis d'une graduation en ampères. Les bornes de l'appareil sont en b et b'.

Fig. 888.

987. **Électrodynamomètres.** — Une mesure d'intensité par les galvanomètres absolus exige la connaissance de la composante horizontale du champ terrestre; de plus, elle ne donne pas d'indication sur les courants alternatifs, car la déviation de l'aiguille change de sens avec le courant. Les *électrodynamomètres* sont des instruments beaucoup moins sensibles que les galvanomètres, mais le même courant y actionne à la fois une bobine fixe et une bobine qui est mobile à l'intérieur de la première ; il en résulte que le sens du déplacement de l'aiguille reste indépendant du sens du courant et, — d'après la formule d'Ampère que —, le moment du couple moteur est proportionnel au carré du nombre qui mesure l'intensité du courant. On peut équilibrer ce couple soit par un couple de torsion, soit par l'effet d'une suspension bifilaire, soit simplement par un poids, comme dans l'électrodynamomètre de M. Pellat et dans celui de M. Berget.

988. **Électrodynamomètre Pellat.** — L'électrodynamomètre de M. Pellat (fig. 889) se compose essentiellement d'une bobine B, horizontale et perpendiculaire au plan du méridien. Nous la supposerons infiniment longue et formée par une seule couche de fil renfermant n spires par unité de longueur. Un courant d'intensité i traversant la bobine crée à l'intérieur de celle-ci un champ magnétique, uniforme d'intensité $H_1 = 4\pi ni$.

Une deuxième bobine b, dont l'axe est vertical, est disposée dans ce champ. Lorsqu'elle est traversée par le courant i, elle équivaut à un aimant de moment magnétique $M = Si$, S désignant la surface totale embrassée par les

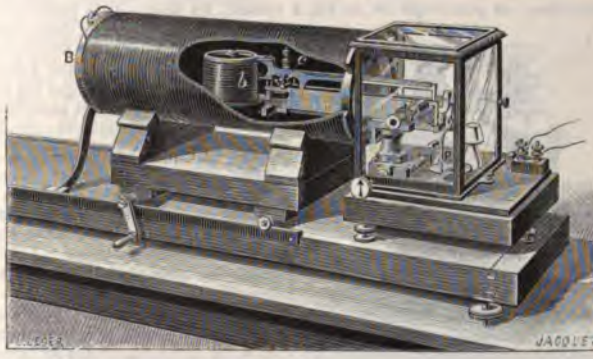


Fig. 889.

spires de la bobine intérieure. Le moment mécanique développé par le champ est MH_1, et il est égal à $4\pi nSi^2$.

Supposons qu'on maintienne la bobine b en équilibre à l'aide d'un poids pt exprimé en dynes, placé à l'extrémité d'un bras de levier d; on a évidemmen l'équation d'équilibre

$$pd = 4\pi nSi^2,$$

d'où l'on tire

$$i = \sqrt{\frac{d}{4\pi nS}}\sqrt{p} = K\sqrt{p},$$

en désignant par K la *constante* de l'instrument, qui est $\sqrt{\frac{d}{4\pi nS}}$.

Ainsi disposé, l'appareil constitue un *électrodynamomètre absolu*.

APPLICATIONS DES INSTRUMENTS DE MESURE : MESURES ÉLECTRIQUES.

989. **Shunt des galvanomètres.** — Dans les mesures galvanométriques, toutes les fois que l'instrument est très sensible et que l'intensité du courant serait assez forte pour le détraquer, on emploie un appareil spécial, appelé *shunt*. Le shunt permet de faire passer à volonté dans le galvanomètre une fraction *quelconque du courant, ou bien* le courant tout entier, ou enfin de le sup*primer. Nous en avons fait* la théorie précédemment.

Description. — Il se compose d'une série de trois bobines de fil conducteur, dont les résistances sont respectivement égales à $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$ et $\frac{1}{999}$ de la *résistance du galvanomètre conjugué*. Elles sont renfermées dans une boîte cylindrique en métal (fig. 890), dont le couvercle est une plaque isolante en ébonite. Six pièces métalliques, de résistance négligeable à cause de leur épaisseur, sont disposées sur la plaque ; elles sont isolées entre elles par l'ébonite, sauf la pièce centrale CA, qui est reliée métalliquement avec la pièce postérieure de droite. Les trois pièces antérieures peuvent être mises en communication avec CA, et, par suite, avec la pièce postérieure de droite, à l'aide de chevilles métalliques ; on peut relier de même, à volonté, les deux pièces postérieures. Celles-ci sont munies de deux bornes métalliques : à celle de gauche sont reliées les trois bobines par l'une de leurs extrémités, tandis que les trois autres bouts aboutissent séparément aux trois pièces antérieures marquées $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$.

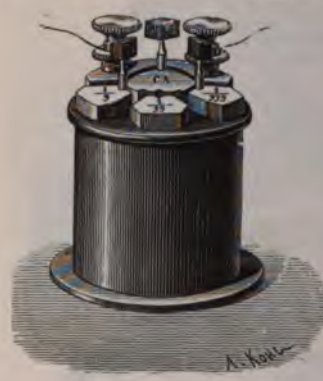


Fig. 890.

Opération — On attache les fils du circuit de la pile aux deux bornes. On y attache aussi les deux rhéophores du galvanomètre : l'instrument est alors placé en dérivation dans le circuit.

Si l'on met une cheville entre les deux pièces postérieures du shunt, et qu'on supprime toutes les autres, tout le courant passe par l'ensemble des deux pièces postérieures, dont la résistance est négligeable, et il n'en passe dans le galvanomètre qu'une fraction insensible.

Si, au contraire, on supprimait la cheville, tout le courant passerait par le galvanomètre, parce qu'il y aurait une interruption dans l'autre dérivation.

Si, enfin, on place la cheville entre la pièce CA et la pièce $\frac{1}{9}$, par exemple, le courant passera alors dans deux circuits dérivés, l'un constitué par le galvanomètre, et l'autre par la bobine du shunt (de résistance égale à 1/9 de celle du galvanomètre).

Remarques. — 1° Dans les mesures au galvanomètre, on peut considérer les faibles déviations comme proportionnelles à l'intensité du courant. La *constante de proportionnalité* peut être déterminée expérimentalement en faisant passer un même courant dans le galvanomètre et dans une boussole des tangentes.

2° Les lectures des petits angles se font par la méthode de la réflexion. Si d est le déplacement sur la règle, D la distance de celle-ci au miroir, on a

$$2\alpha = \frac{d}{D}, \qquad \text{d'où} \qquad \alpha = \frac{d}{2D}.$$

Pour placer toujours un galvanomètre à trois vis calantes dans la même position, on numérote ces vis et on les place respectivement dans un trou, une rainure et un plan fixés au support stable utilisé.

990. **Comparaison des résistances.** — On applique le cas de dérivation connu sous le nom de *pont de Wheatstone* à la mesure des résistances. C'est le procédé le plus commode et le plus employé.

1° *Principe de la méthode.* — Le pont de Wheatstone est une dérivation qui a la forme *schématique* d'un losange avec deux diagonales (fig. 891). La grande diagonale est placée en dehors du losange : elle contient la pile (ou le contact électromoteur) ; la petite diagonale constitue à proprement parler le *pont*.

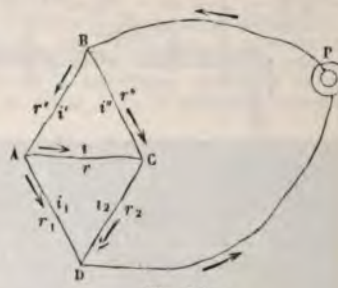


Fig. 891.

Le courant vient du pôle positif de la pile et y revient après avoir parcouru les cinq conducteurs du losange, comme l'indiquent les flèches. On voit que le courant doit circuler dans le *pont* aussi bien de A vers C que dans le sens inverse ; l'effet résultant dépend de la valeur du potentiel en A et en C.

On a vu que, si les résistances des quatre côtés sont choisies de manière que l'on ait

$$r' r_2 - r'' r_1 = 0 \qquad \text{ou} \qquad \frac{r'}{r''} = \frac{r_1}{r_2},$$

on aura $i = 0$, c'est-à-dire qu'il ne passera pas de courant dans le pont et qu'un galvanomètre intercalé dans ce pont restera au zéro : c'est le cas particulier qui est utilisé. Comme la différence de potentiel entre les points A et C est nulle en même temps que le courant i, il est clair que l'on peut se servir d'un électromètre capillaire pour équilibrer le pont.

2° *Application de la méthode.* — Imaginons qu'on forme les deux côtés BA et BC avec deux bobines de résistance qu'on peut rendre équivalentes ; qu'en CD on place un *rhéostat* R, c'est-à-dire un *conducteur de résistance variable et constamment connue*, et en AD la résistance inconnue x, et enfin un galvanomètre dans le pont.

On modifie alors les résistances variables jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre reste au zéro. A ce moment le courant dérivé du pont est nul, et l'on a

$$r' r_2 - r'' x = 0,$$

d'où

$$x = \frac{r' r_2}{r''}.$$

On aura immédiatement x en fonction des trois résistances connues.

Remarque. — Pour faire plus commodément l'expérience, on prend quelquefois $r' = r''$: il suffit pour cela d'avoir deux bobines de résistance *équivalentes*. On place ensuite la résistance à mesurer entre A et D et l'on fait varier la longueur du fil d'un *rhéostat* qu'on place entre C et D, jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre soit ramenée au zéro.

Comme $r'' = r'$, l'équation ci-dessus se réduit à

$$x = r_2.$$

On a avantage à rendre les trois résistances r', r'', r_1 aussi égales que possible, parce que la méthode présente alors son maximum de sensibilité.

3° *Appareil à pont.* — Dans la pratique, la diagonale qui contient le galvanomètre et qui constitue le pont est également en dehors du losange, comme

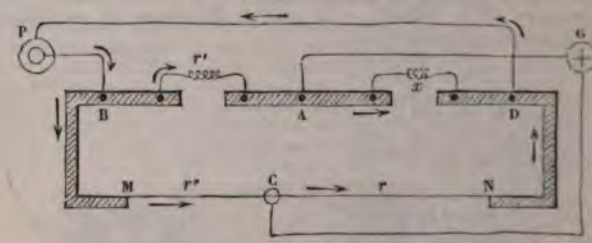


Fig. 892.

la diagonale qui contient la pile. Tout le système est disposé sur une table horizontale. Les portions B, A, D sont des règles métalliques (fig. 892) de résistances négligeables, portant en B, A, D des poupées qui servent à atta-

Fig. 893.

cher les fils des bobines. On attache en r' sur le côté BA une boîte de résistance : en x on met la résistance à mesurer (AD). MN est un *rhéostat de Pouillet*, c'est-à-dire un simple fil de platine tendu que le curseur C divise en deux portions qui forment les côtés BC et CD.

Fig. 894.

La manipulation est des plus simples. On n'a qu'à faire mouvoir le curseur C jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre reste au zéro. A ce moment on a l'équation d'équilibre ci-dessus, d'où l'on tire

$$\frac{x}{r'} = \frac{r}{r''}.$$

Remarque. — *Boîtes de résistance. — Boîte à pont.* — Les *boîtes de résistance* sont des résistances graduées en ohms et contenues dans des boîtes munies de clefs spéciales (fig. 895) : il suffit d'enlever une clef de la boîte pour

introduire la résistance correspondante (fig. 894) dans le circuit du courant qui entre en A et sort en B. Certaines boîtes de résistance, dites *boîtes à pont*, sont montées de façon à permettre la comparaison sûre et rapide des deux résistances.

991. **Mesure de la résistance intérieure d'une pile.** — On peut, par exemple, fermer la pile par une très grande résistance R comprenant un galvanomètre. Soit I l'intensité du courant indiqué, soit d'autre part I' l'intensité du courant dans une dérivation de résistance r, du même ordre de grandeur que celle de la pile. L'application de la loi d'Ohm, comme on l'a fait dans les problèmes, donne pour la valeur x de la résistance cherchée, en négligeant le rapport $\frac{r}{R}$,

$$\frac{x}{r} = \frac{I - I'}{I'}.$$

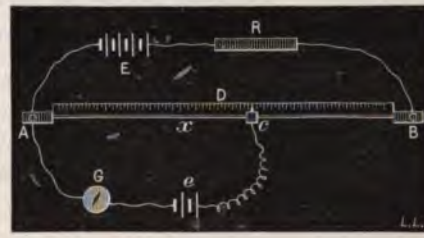


Fig. 895.

992. **Comparaison des forces électromotrices de deux piles.** — On établit (fig. 895) dans le circuit d'une pile ou d'une batterie de piles auxiliaires E une boîte de résistance R et un fil bien homogène AB. Un second circuit comprenant l'une des piles à comparer de force électromotrice e, et un galvanomètre G est fermé par une portion x de résistance du fil AB. On déplace le curseur c de manière à amener le galvanomètre au zéro, ce qui suppose que le courant dérivé dans le galvanomètre est de sens contraire à celui que fournit E. Si l'intensité du courant dans AB est alors I, on a évidemment

$$e = Ir,$$

r étant la résistance du segment x lorsque le galvanomètre est à zéro.

Avec l'autre pile e' on a de même

$$e' = Ir', \text{ d'où } \frac{e}{e'} = \frac{r}{r'}.$$

$$\text{Or } \frac{r}{r'} = \frac{x}{x'}, \text{ donc } \frac{e}{e'} = \frac{x}{x'}.$$

On lit les longueurs x et x' sur une règle fixée près de AB.

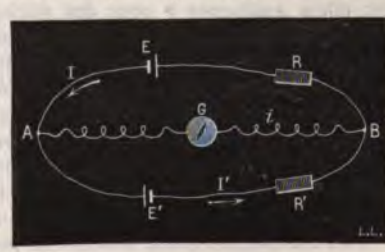


Fig. 896.

Remarques. — 1° Il est bon de substituer au galvanomètre G un électromètre capillaire si l'on veut éviter qu'il ne passe un conrant.

2° La pile e peut être l'un des étalons de force électromotrice décrits antérieurement.

993. **Comparaison des forces électromotrices de deux piles en marche.** — *Les deux piles E et E' sont disposées de façon à opposer leurs courants (fig. 896) dans la dérivation AB renfermant un galvanomètre ou un électromètre.* C

fait varier les résistances R et R' des deux portions AEB, AE'B du circuit de façon à amener le galvanomètre à zéro. A cet instant l'intensité I est la même le long des deux segments AEB et AE'B. On a, en appliquant la loi d'Ohm au circuit EAB, $E = RI$, en désignant par E la force électromotrice de la pile E.

On a de même le long de E'BA : $E' = R'I$, d'où

$$\frac{E}{E'} = \frac{R}{R'}.$$

Si on fait varier les résistances de quantités r et r', telles que l'on ait encore

$$\frac{E}{E'} = \frac{R + r}{R' + r'},$$

il est clair, en vertu d'une propriété bien connue des rapports, que l'on a

$$\frac{E}{E'} = \frac{r}{r'}.$$

Cette méthode permet d'apprécier l'effet de polarisation de la pile.

CHAPITRE IX

EFFETS CALORIFIQUES ET LUMINEUX DES COURANTS VOLTAIQUES. THERMO-ÉLECTRICITÉ.

994. **Phénomènes généraux.** — 1° *Fusion et volatilisation des solides.* — Un courant qui parcourt un fil métallique y produit des effets analogues à ceux des décharges de batteries : le fil s'échauffe, devient incandescent, fond ou se volatilise, selon qu'il est plus ou moins long et d'un diamètre plus ou moins fort et que le courant produit est plus ou moins intense. Le charbon est le seul corps qui ait été réfractaire à la fusion par les courants. Cependant Despretz, avec une pile en batterie formée de six séries parallèles de 100 éléments Bunsen chacune, a porté des baguettes de charbon très pur à une température telle, qu'elles se sont courbées, ramollies, et ont pu se souder ensemble.

Avec un courant assez intense, on peut fondre et même volatiliser des fils fins de plomb, d'étain, de zinc, de cuivre, d'or, d'argent, de fer et même de platine. Le fer et le platine brûlent avec une lumière d'un blanc éclatant ; le plomb, avec une lumière purpurine ; celle de l'étain et de l'or est d'un blanc bleuâtre ; celle du zinc est mêlée de blanc et de rouge ; enfin, le cuivre et l'argent donnent une lumière verte.

2° *Échauffement des liquides.* — Le passage du courant à travers un liquide l'échauffe aussi, et d'autant plus que le courant est plus intense et que le liquide est moins bon conducteur.

995. **Lois de Joule.** — Les lois de ces phénomènes ont été découvertes par Joule. Il les a vérifiées au moyen d'un calorimètre spécial qui permettait d'évaluer la quantité de chaleur dégagée dans un fil de résistance connue par un courant d'intensité connue. Elles ont été rattachées antérieurement au principe de la conservation de l'énergie. En voici les énoncés :

1° *La quantité de chaleur dégagée, en un temps donné, dans un conducteur de resistance donnée, est en raison directe du carré de l'intensité du courant.*

2° *La quantité de chaleur dégagée par un courant d'intensité donnée est en raison directe de la résistance du conducteur.*

Ces lois sont comprises dans la formule suivante :

$$Q = ArI^2t,$$

où A est une constante, à savoir l'inverse de l'équivalent mécanique de la calorie, r la résistance de la portion de circuit considérée, I l'intensité du courant et t la durée du passage.

Ces lois s'appliquent à toutes les portions intérieures ou extérieures du circuit traversé par le courant. Elles ont été vérifiées par Becquerel, qui les a étendues aux conducteurs extérieurs liquides, dans le cas du moins où il n'y a pas de réaction secondaire absorbant de la chaleur.

Conséquence : *Température-limite d'un conducteur.* — Si un conducteur a une longueur l, un rayon r, et s'il est traversé par un courant d'intensité I, il reçoit par seconde une quantité de chaleur égale à

$$\frac{1}{E} I^2 \frac{l\rho}{\pi r^2},$$

ρ étant la résistance spécifique du conducteur. Si e est le pouvoir émissif de sa surface, il rayonne une quantité de chaleur égale à $2\pi rleT$, lorsque l'excès de sa température sur le milieu ambiant est égale à T. Or la température limite T est atteinte lorsque le conducteur rayonne toute la chaleur qu'il reçoit. On a alors

$$2\pi rleT = \frac{I^2}{E}\frac{l\rho}{\pi r^2}, \qquad \text{d'où} \qquad T = \frac{I^2}{2E\pi^2}\cdot\frac{\rho}{er^3}.$$

En réalité ρ et e varient avec la température, mais leur rapport est sensiblement constant. La sécurité des appareils exige que l'on évite un trop grand *échauffement.*

996. **Origine de la chaleur dégagée dans la pile.** — Cette chaleur est due à l'oxydation du zinc et à la combinaison de l'oxyde avec l'acide sulfurique dans le couple Volta. Joule a fait voir qu'*elle est proportionnelle au nombre d'équivalents de zinc consommés pour produire le courant*. Le courant *ne crée* donc *pas* la chaleur, il ne fait que transporter dans les différentes parties du circuit, proportionnellement à leur résistance, la chaleur dégagée dans la pile par les actions chimiques.

Silbermann et Fabre, qui ont vérifié la loi de Joule, ont constaté que la double action chimique de l'oxydation du zinc et de la combinaison avec l'acide sulfurique de l'oxyde formé dégage 18 796 petites calories par équivalent de zinc dissous, et que ces calories se retrouvent intégralement dans le circuit extérieur et intérieur de la pile.

997. **Assimilation de la pile électrique à une machine à feu.** — L'action électromotrice dans la pile se traduisant en chaleur, et celle-ci pouvant toujours se convertir en travail, on a pu comparer la pile à une machine à feu, où la combustion du zinc remplacerait celle du charbon, et qui serait capable de produire un travail déterminé, *équivalent* à la chaleur qui disparaît dans le circuit. En effet, M. Fabre ayant placé dans un des moufles du calorimètre à mercure une petite pile, et dans l'autre un tout petit moteur électromagnétique qu'on pouvait faire marcher à volonté, a trouvé que, tant que la machine était en repos, la chaleur dégagée dans tout le circuit était constamment de 18 796 calories par équivalent de zinc dissous, mais que le nombre de calories diminuait dès que la machine fonctionnait, et que la chaleur disparue était équivalente au travail effectué.

998. **Effets lumineux.** — Les effets lumineux des courants sont des conséquences directes de leurs effets calorifiques. Dès que le dégagement de chaleur est assez intense, il y a un *dégagement de lumière*, qui se manifeste soit par des étincelles, soit par l'incandescence des rhéophores, soit par un *arc voltaïque*.

Les pôles d'une pile présentant une faible différence de potentiels, sauf dans le cas d'un nombre de couples considérable, il ne se produit point d'étincelle quand on les réunit par un fil de cuivre; mais, à la rupture du circuit une étincelle apparaît, d'autant plus forte que les couples sont plus nombreux. Quand les pôles d'une pile puissante sont réunis par un fil de fer ou de platine, assez fin pour être très résistant, mais assez gros pour n'être pas fondu, ce fil devient incandescent et jette un vif éclat pendant tout le temps que le courant passe. Si le fil est enroulé sur lui-même en hélice, l'effet lumineux est augmenté.

999. **Arc voltaïque : sa constitution ; sa haute température.** — C'est surtout en prenant pour électrodes deux cônes de charbon de cornue qu'on obtient un bel effet de lumière électrique.

Le charbon négatif (—) est fixe, tandis que le charbon positif (+) peut s'élèver ou s'abaisser plus ou moins, soit à la main, soit à l'aide d'un mécanisme. Les charbons étant mis en contact,

Fig. 897.

le courant passe et les rend aussitôt incandescents. Si on les écarte alors, il se produit de l'un à l'autre un arc lumineux, d'un éclat éblouissant, auquel on a donné le nom d'*arc voltaïque* (fig. 897). La longueur que peut atteindre cet arc dépend de la force électromotrice de la source d'électricité[1].

1. *La figure 897 représente* un arc voltaïque agrandi par projection (*expérience de Foucault*).

On constate que, même dans le vide, le charbon positif décroît lentement, et se creuse, tandis que le charbon négatif augmente. Dans l'air la différence est beaucoup plus sensible : le charbon positif *s'use deux fois plus vite* que le charbon négatif[1]. On a d'abord admis, pour expliquer ce fait, qu'il y a transport des molécules de charbon du premier pôle au second. Mais si, au lieu de former l'arc entre deux charbons, on prend comme électrodes deux métaux différents, cuivre et argent par exemple, on reconnaît, par les dépôts qui se produisent, qu'il y a transport dans les deux sens. C'est ce qui a lieu également avec les charbons; mais comme c'est du pôle positif au pôle négatif que le transport est le plus abondant, on ne constate que l'effet résultant.

L'arc voltaïque est donc dû aux particules de charbon qui sont volatilisées, puis transportées d'un pôle à l'autre, et forment une chaîne continue qui ferme le circuit; cette chaîne, présentant une grande résistance, s'échauffe jusqu'à produire le vif dégagement de lumière qui caractérise l'arc.

En résumé, l'arc voltaïque est dû à l'incandescence d'un conducteur gazeux *très résistant*, dont l'éclat est considérablement augmenté, comme celui de toutes les flammes, par la présence de particules solides de charbon.

Le creux ou *cratère* du crayon positif est plus lumineux que le reste de l'arc. Sa température, indépendante de la puissance de l'arc, a été fixée par M. Violle à 3500° environ.

1000. **Applications de l'arc voltaïque.** — La haute température de l'arc voltaïque a reçu de nombreuses et importantes applications industrielles. Nous citerons en particulier :

1° L'éclairage des grands espaces à l'aide d'appareils nommés *régulateurs de lumière électrique*.

2° La soudure *autogène* des métaux, par exemple du fer (*soudure électrique*).

3° La fabrication industrielle (*électrométallurgie*) de certains métaux ou alliages, tels que l'aluminium, le bronze d'aluminium, et des métaux rares. A ce genre d'applications se rattachent les recherches de M. Troost, de M. Joly et de M. Moissan. Citons aussi les belles expériences de ce dernier sur la reproduction du diamant.

Fabrication du bronze d'aluminum. — Four Héroult. — Nous citerons, comme exemple des procédés électrométallurgiques, le procédé Héroult pour la fabrication du bronze d'aluminium. Il

1. A la condition que l'arc provienne d'un électromoteur à courant continu (pile, accumulateur ou dynamo).

consiste à traiter directement par l'arc voltaïque un mélange de *corindon* (alumine cristallisée), de cuivre en grains très pur et de charbon concassé, dans un four spécial dit *four électrique*. C'est une caisse en fonte *au* (fig. 898), doublée intérieurement de briques en charbon agglomméré, lavées au goudron, qui constituent un revêtement réfractaire et conducteur A, et formée par une plaque de graphite KK. On introduit les matières à traiter par deux ouvertures latérales *nn* pratiquées dans l'obturateur, et, par une ouverture centrale carrée, l'électrole positive, formée d'un faisceau de plaques de charbon *bb*. Le pôle négatif de l'électromoteur (machine dynamo-électrique) est relié au revêtement intérieur du four par l'intermédiaire de la fonte *a* et des bornes *a'*. Enfin un orifice C, fermé par un tampon de charbon, permet l'écoulement du métal fondu, une fois l'opération terminée.

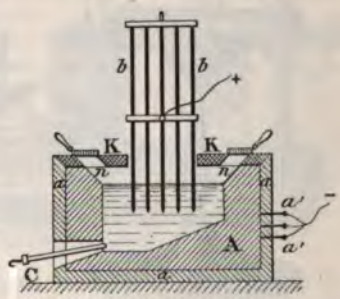


Fig. 898.

Four Moissan. — M. Moissan a réussi à préparer le carbone cristallisé ou diamant dans un four électrique à réverbère, disposé de manière à utiliser l'énorme chaleur dégagée par l'arc. Il se compose essentiellement d'une enceinte de charbon, logée dans un bloc de chaux. L'arc jaillit entre deux électrodes horizontales en charbon, qui passent par deux trous pratiqués dans les parois du four, et qui sont portées par deux chariots, de manière à être rapprochées ou éloignées à volonté.

Four Ducretet. — M. Ducretet a récemment construit un modèle très pratique de ce four électrique.

COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES

1001. **Définition. — Expérience de Seebeck.** — De même que les courants engendrent de la chaleur, celle-ci, dans certaines conditions, peut engendrer des courants. Ces courants, dont on a déjà parlé plus haut, sont appelés *thermo-électriques*, *pour les distinguer* des courants dits courants hydro-électriques, *qui sont dus aux actions* chimiques.

On savait déjà que plusieurs cristaux naturels, comme la tourmaline, la topaze, acquièrent des propriétés électriques lorsqu'on élève leur température, et Volta avait découvert qu'une lame d'argent chauffée inégalement à ses extrémités constitue un élément électromoteur; mais c'est Seebeck qui le premier, en 1821, démontra nettement que le mouvement de la chaleur dans un circuit métallique donne naissance à des courants électriques.

Fig. 899.

Il prenait pour circuit une lame de cuivre *mn* dont les extrémités sont recourbées et soudées à une lame de bismuth *op* (fig. 899). Dans l'intérieur du circuit ainsi formé est une aiguille aimantée *a* mobile sur un pivot. On place l'appareil dans la direction du méridien magnétique et l'on chauffe l'une des soudures : on voit alors l'aiguille prendre une déviation qui indique le passage d'un courant *qui va de n vers m, c'est-à-dire de la soudure chaude à la soudure froide, en passant par le cuivre*. Si, au lieu de chauffer la soudure *n*, on la refroidit avec de la glace, en conservant à l'autre soudure sa température, il se produit encore un courant, mais de sens inverse, c'est-à-dire allant de *m* vers *n*. Dans les deux cas, le courant est d'autant plus intense que *la différence de température des deux soudures est plus grande*.

Fig. 900.

Enfin, si l'on chauffe également les deux soudures, il n'y a pas production de courant.

1002. **Couples** et **Piles thermo-électriques : Piles de Pouillet, de Nobili, de Clamond.** — On nomme couple *thermo-électrique* un

système de deux métaux soudés l'un à l'autre, comme celui de

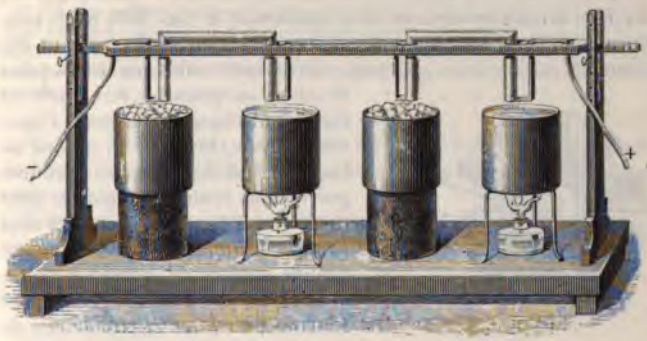


Fig. 901.

Seebeck, et dont les extrémités libres peuvent être réunies par un conducteur. La figure 900 représente le couple bismuth-cuivre dont Pouillet s'est servi dans ses recherches sur les lois des courants.

En réunissant plusieurs de ces couples en série, comme des éléments de Volta, on forme une *pile thermo-électrique*. On la fait fonctionner en maintenant les soudures de rang impair, par exemple, à zéro dans de la glace, et en chauffant celles de rang pair à 100° dans des vases remplis d'eau bouillante (fig. 901).

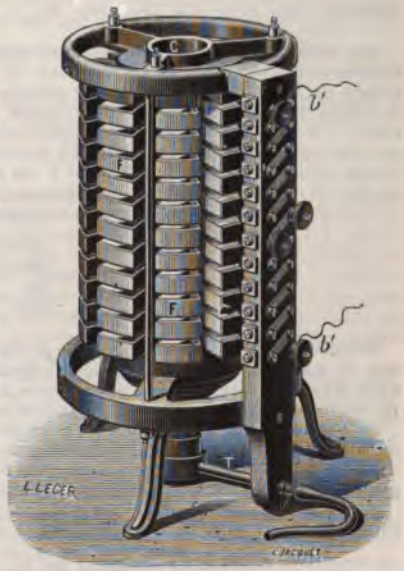


Fig. 902.

On a beaucoup varié la disposition des piles thermo-électriques. *L'une des plus connues* est la pile de Nobili (fig. 906).

M. Clamond a imaginé une pile thermo-électrique très pratique (fig. 902). Elle est formée d'éléments, constitués chacun par du fer F et un alliage de zinc et d'antimoine A (fig. 903) avec soudure autogène. Ces éléments sont associés en séries suivant des tranches horizontales qui sont reliées entre elles par leurs pôles de noms contraires *b*, *b*. La pile est fortement chauffée au gaz à l'intérieur de la cheminée C, autour de laquelle sont disposées les soudures *paires*. Les soudures *impaires* sont disposées à l'extérieur et elles sont groupées de manière à présenter une grande surface de refroidissement.

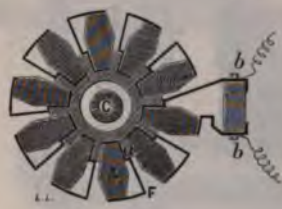


Fig. 903.

Le type de 150 éléments peut fournir une *force électromotrice* de 8 volts et a une *résistance intérieure totale* de 3,2 ohm (soit 0,025 ohm par élément). Le rendement d'une telle pile approche de $\frac{1}{200}$.

1003. Série thermo-électrique. — Pouvoirs thermo-électriques des métaux. — Phénomène de l'inversion. — Les variations de sens et d'intensité du courant thermo-électrique ont été étudiées par plusieurs physiciens, entre autres par Becquerel. Il mesurait l'intensité dans chaque cas, au moyen d'un galvanomètre. Il a déterminé d'abord le *sens* des courants obtenus par l'association des différents métaux. Il est parvenu à les ranger dans un ordre tel, que chaque métal de la série, étant associé à l'un quelconque des suivants, donne un courant qui va du premier au deuxième, *en passant par la soudure chaude*. Cette série de métaux, dite *série thermo-électrique*, est la suivante :

Bismuth.	Cobalt.	Plomb.	Fer.
Nickel.	Manganèse.	Cuivre.	Arsenic.
Platine.	Argent.	Or.	Antimoine.
Palladium.	Étain.	Zinc.	

Becquerel détermina ensuite le *pouvoir thermo-électrique* d'un métal couplé avec un autre dans un circuit fermé : il appelait ainsi l'*intensité du courant* qu'on obtient en chauffant l'une des soudures à une température donnée, 20° par exemple, tandis que l'autre est maintenue à zéro.

Certains couples présentent le phénomène de l'*inversion*, c'est-à-dire que la force électromotrice, après avoir augmenté avec la température de la soudure chauffée, diminue, puis change de sens. Pour le couple *Cuivre-Fer*, par exemple, le maximum de la force électromotrice a lieu vers 274°.

1004. Lois des forces électromotrices thermo-électriques. — On a étudié à l'électromètre la force électromotrice des couples thermo-électriques dans des conditions données. En désignant par $E_{\theta}^{\theta'}$ la force électromotrice d'un couple dont les soudures sont respectivement maintenues aux températures θ (soudure froide) et θ' (soudure chaude), on peut énoncer les lois suivantes :

1° *Loi des températures successives. — La force électromotrice d'un couple donné, entre deux* températures θ et θ', est égale à *la somme des forces électro-*

motrices du même couple $E_{\theta}^{\theta_1}$ *et* $E_{\theta_1}^{\theta'}$ θ_1, θ_1 *étant une température comprise entre* θ *et* θ'.

2° *Loi des métaux intermédiaires. — La force électromotrice d'un couple dont l'un des contacts est à la température* θ *ne change pas lorsqu'on remplace le contact par un ou plusieurs métaux à température* θ. *On pourra donc, sans rien changer, établir une soudure effective entre les deux éléments d'un couple.*

3° *Lois de Pouillet.* — A ces lois on peut joindre la loi générale de Pouillet, laquelle fut, comme on le sait, trouvée d'abord pour cette espèce de pile.

L'intensité I *d'un courant thermo-électrique fourni par une pile dans des conditions déterminées est donnée par la formule générale*

$$I = \frac{E}{r}.$$

Remarque. — *Constantes des piles thermo-électriques.* — E est la force électromotrice de la pile et r la résistance extérieure. Quant à la résistance intérieure, elle est généralement négligeable surtout pour un petit nombre de couples, formés de lames ou de barreaux gros et courts.

Une pile thermo-électrique est donc exactement comparable à une pile hydro-électrique qui aurait une résistance intérieure *négligeable* et une *faible* force électromotrice.

1005. Origine des courants thermo-électriques. — Effet Peltier. — Les courants thermo-électriques ne proviennent pas d'actions chimiques, car Becquerel a constaté qu'ils se produisent également dans le vide et dans un gaz inerte, tel que l'hydrogène. Magnus a fait voir qu'un circuit de deux conducteurs cylindriques de cuivre, d'inégal diamètre, mais dans les mêmes conditions physiques l'un et l'autre, étant chauffé à l'une des soudures, ne donne point de courant, quelle que soit la différence de diamètre et de masse entre ces conducteurs. Il ne s'en produit qu'autant qu'il existe *une différence de structure ou de densité* des deux côtés du point chauffé.

On peut rapprocher de ces faits le phénomène découvert par Peltier (*effet Peltier*). Lorsqu'un courant circule dans un circuit formé de deux conducteurs différents, il se produit un échauffement ou un refroidissement, suivant le sens du courant, à l'endroit où il quitte un des conducteurs pour passer dans le suivant. La quantité de chaleur cédée ou prise est proportionnelle à l'intensité du courant.

En résumé, il faut considérer les forces électromotrices thermo-électriques comme résultant de forces électromotrices de contact de Volta, qui seraient variables avec la température du contact des métaux hétérogènes. L'énergie est empruntée à la soudure chaude, grâce à l'effet Peltier. Et pour se rendre compte de l'*inversion*, il faut tenir compte, en outre, de forces électromotrices signalées par Sir W. Thomson, et qui sont dues à la non-uniformité de température dans un conducteur homogène[1].

1. *Voir* J. Joubert. *Traité élémentaire d'électricité.*

1006. Thermomultiplicateur. — Nous avons indiqué ci-dessus (547) l'importante application des courants thermo-électriques faite par Melloni au thermomultiplicateur.

Description de la pile. — La pile thermo-électrique de cet appareil thermométrique est constituée par une série de couples bismuth-antimoine de 30 mm de longueur. Ce couple a l'avantage d'avoir une force électromotrice sensiblement proportionnelle à

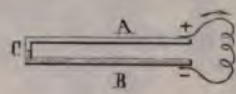


Fig. 904.

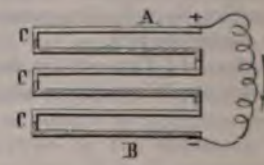


Fig. 905.

la différence de température des deux soudures, entre 0° et 100[1] (fig. 904). On a groupé les couples de manière que toutes les soudures de rang impair soient à une même extrémité, et les soudures de rang pair à l'autre (fig. 905) et l'on a réduit encore le volume de la pile en disposant parallèlement, les unes à côté

Fig. 906.

des autres (fig. 906), plusieurs séries de couples semblables, isolés les uns des autres et isolés de la monture par des bandes de papier verni. Le dernier bismuth de la première série est soudé latéralement au premier antimoine de la deuxième, et ainsi de suite, de manière à former un ensemble de cinq ou six séries de cinq couples chacune. La pile ainsi disposée est maintenue dans une monture de cuivre P munie d'un pied à charnière, ce qui permet de lui donner différentes inclinaisons.

1. Elle varie de 0,000057 volt par degré.

Enfin, sur les côtés de l'appareil sont fixées deux bornes *m*, *n*, qui communiquent, l'une avec le premier antimoine, l'autre avec le dernier bismuth : ce sont les deux pôles de la pile. Pour protéger les deux faces de celle-ci, deux étuis rectangulaires A et B se fixent par des vis de pression *a* et *b* sur la pièce P. Enfin deux écrans E et E', qu'on élève ou qu'on abaisse à volonté, permettent de ne laisser arriver la chaleur que sur une des faces de la pile.

Graduation du thermomultiplicateur. — L'opération consiste à graduer le galvanomètre de l'instrument de manière que ses indications mesurent directement les intensités des faisceaux calorifiques qui tombent sur la pile.

On prend deux sources de chaleur à peu près égales, par exemple deux lampes Locatelli, A et B.

1° On fait agir A, toute seule, à une distance telle qu'elle produise une déviation de 1° : on prend pour *unité de chaleur* la radiation correspondante.

2° On fait de même agir B, de l'autre côté, jusqu'à ce qu'il se produise une déviation de 1°, inverse de la précédente : à ce moment, B envoie aussi l'*unité de chaleur* sur la pile. Si alors on faisait agir les deux sources simultanément, l'aiguille du galvanomètre devrait rester au zéro : c'est ce que l'expérience vérifie.

3° On rapproche alors A, tout en laissant B en place, jusqu'à ce que la déviation redevienne 1°. Soit $I_{a'}$ l'intensité actuelle du faisceau émis par A et I_b celle du faisceau émis par B : comme la déviation est due à la différence d'action des deux sources, on a évidemment

$$I_{a'} - I_b = 1, \quad \text{d'où} \quad I_{a'} = 1 + I_b. \qquad \text{Or} \quad I_b = 1, \quad \text{donc} \quad I_{a'} = 2.$$

4° Or, si l'on faisait agir A tout seul, le galvanomètre *subirait une déviation égale à* 2° ; donc un faisceau d'*intensité* 2 est représenté par *une déviation de* 2°.

Cette proportionnalité se maintient jusqu'à environ 25°.

5° Poursuivons la graduation. Supposons que A produise une déviation de 25° : le faisceau qu'elle envoie alors sur la pile a une intensité 25. Plaçons B de l'autre côté de manière à ramener l'aiguille au 0° : l'intensité du faisceau émis par B est alors 25. Rapprochons A jusqu'à produire une déviation de plus de 10°. On en conclut, comme précédemment, que la différence $I_a - I_b$ est égale à 10 (puisqu'il y a proportionnalité, jusqu'à 25°, entre les intensités calorifiques et les déviations) et l'on a

$$I_a = I_b + 10 = 25 + 10 = 35.$$

Or, si l'on fait agir A tout seul, la déviation *n'est pas* 35°, *mais* 34°. Il n'y a donc plus proportionnalité, et cette différence s'accuse davantage à mesure que la déviation augmente.

On notera alors que l'*intensité* 35 correspond à la *déviation* 34°. En continuant de la même manière, on trouvera empiriquement toutes les intensités, correspondantes aux déviations de l'aiguille, depuis 25° jusqu'à 90°.

Remarques. — 1° *Substitution des impulsions aux déviations.* — Si le faisceau calorifique n'agit que peu de temps sur la pile, celle-ci ne s'échauffe pas et l'aiguille revient au 0° dès que l'action cesse. Il n'en est pas ainsi lorsque l'action duré. Or on était d'abord obligé de la faire durer jusqu'à ce que l'aiguille eût pris sa position d'équilibre finale. Melloni ayant remarqué que l'*impulsion initiale* de l'aiguille est *proportionnelle* à la déviation finale, on peut *substituer l'observation* des impulsions à celle des déviations. Cela permet de *réduire chaque expérience à un instant.*

2° *Table de graduation.* — La graduation empirique du thermomultiplicateur se composera donc d'une table à trois colonnes, indiquant la première les impulsions, la deuxième les déviations de l'aiguille et la troisième les quantités de chaleur correspondantes. On doit construire une table pour chaque instrument.

3° Cette graduation du galvanomètre peut, en outre, servir à la mesure de courants quelconques, puisque les indications du galvanomètre mesurent à la fois les intensités calorifiques et les intensités des courants.

1007. Pinces thermo-électriques. Aiguille thermo-électrique. — Un système de deux couples thermo-électriques *ab*, *a' b'* disposés en série (fig. 907) de manière qu'on puisse appliquer deux des soudures en regard du point dont on veut estimer la température, constitue une *pince thermo-électrique*. Un galvanomètre mesure l'intensité du courant produit; on pourrait aussi utiliser un électromètre et apprécier la force électromotrice. Si ce sont des couples bismuth-antimoine, le courant est proportionnel à la différence des températures jusqu'à 100° environ.

Fig. 907.

Dans l'*aiguille thermo-électrique* de Becquerel on oppose les couples et l'on obtient la température d'un point déterminé en faisant varier la température connue de l'autre soudure de façon à annuler tout courant.

En formant un couple platine platine-rhodié dont l'une des soudures est maintenue dans le foyer dont on veut évaluer la température, on peut, avec une précision très suffisante pour l'industrie, repérer des températures pouvant atteindre 1200 degrés et plus. C'est avec ces instruments que M. Lechatelier a établi son échelle des températures élevées.

CHAPITRE X

INDUCTION ÉLECTRODYNAMIQUE.

1008. Définitions. — Faraday a appelé *courants d'induction*, ou *courants induits*, des courants qui sont produits *à distance*, dans des circuits métalliques fermés, par l'influence soit de courants électriques, soit d'aimants puissants, soit du magnétisme terrestre. Il y a donc lieu de distinguer, au moins à première vue, suivant l'origine des courants induits :

1° L'induction par les courants ou *induction voltaïque*; 2° l'induction par les aimants, ou *induction magnétique*; 3° l'induction par la terre, ou *induction tellurique*.

A ces trois modes d'induction correspondent trois catégories de courants, qui sont les *courants induits proprement dits*; on peut y ajouter deux autres modes d'induction :

1° L'induction par des décharges de bouteilles de Leyde ou de batteries électriques, appelée *leyde-électrique*;

2° L'induction d'un courant voltaïque sur son propre circuit, ou *self-induction*, laquelle engendre les *extra-courants*.

1009. **Induction voltaïque.** — *Expériences.* — Lorsqu'un courant induit naît dans un circuit fermé, sous l'influence d'un autre courant, ce dernier est appelé *courant inducteur*.

L'induction voltaïque se produit dans trois circonstances : 1° quand le courant inducteur commence ou finit; 2° quand son intensité croît ou décroît; 3° quand sa distance au circuit induit diminue ou augmente.

1er *Procédé.* — On se sert d'une *bobine* à deux fils (fig. 908),

Fig. 908.

formée d'un cylindre creux de carton ou de bois, sur lequel s'enroulent en hélice, d'abord un gros fil de cuivre, puis un fil plus fin, tous les deux bien isolés. Le gros fil, qui ne fait qu'un petit nombre de tours, vient se terminer à deux bornes *c* et *d*, fixées sur une planchette qui porte la bobine : c'est le *circuit inducteur*; le fil fin, qui est enroulé par-dessus le premier, fait un grand nombre de tours et aboutit à deux autres bornes *a* et *b* : c'est le *circuit induit*.

On met un galvanomètre dans ce dernier circuit et dans le circuit inducteur une pile avec un interrupteur. On observe alors les phénomènes suivants :

1° Dès qu'on établit le courant inducteur, le galvanomètre indique dans le fil fin un courant *inverse*, c'est-à-dire de sens contraire au courant inducteur, qui dure pendant la période d'établissement de celui-ci.

2° Dès qu'on interrompt le courant inducteur, il se produit de nouveau, dans le fil fin, un courant induit *direct*, et de même durée que la période d'interruption.

2° *Procédé*. — On prend une bobine creuse B à un seul fil long et fin (fig. 909), et une seconde bobine A à un seul fil aussi,

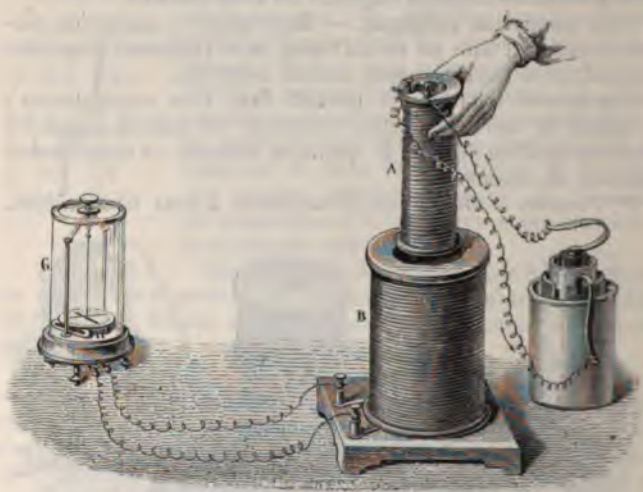


Fig. 909.

mais gros et court, qui peut entrer dans la première. La bobine A étant parcourue par un courant continu, si on l'introduit brusquement dans la bobine B, un galvanomètre relié à cette dernière indique, par le sens de sa déviation, qu'il se produit immédiatement dans la grosse bobine un courant *inverse* de même durée que le déplacement. Et, si on la retire rapidement, le galvanomètre accuse dans le fil fin un courant induit *direct*.

Remarque. — Lorsque, au lieu d'introduire ou de retirer brusquement la bobine à gros fil, on l'approche ou on l'éloigne lentement, le galvanomètre n'indique qu'un courant faible, et d'autant plus faible que le mouvement est plus lent, c'est-à-dire que l'action induisante a plus de durée.

5° *Procédé.* — Si, au lieu de faire varier la distance du courant inducteur, on fait varier son intensité, en augmentant ou en diminuant la résistance de son circuit par exemple, on produit dans le fil fin un courant induit, qui est *inverse* si l'intensité du courant inducteur augmente, et *direct* si elle diminue.

1010. **Induction magnétique ou magnéto-électrique.** — Un aimant peut aussi faire naître, dans les circuits métalliques, des courants d'induction. Faraday a démontré ce fait au moyen d'une bobine creuse à un seul fil long et fin analogue à la précédente (fig. 909) :

1° Dès qu'on introduit le barreau, il passe dans le fil un courant induit de même durée que le mouvement. Ce courant est *inverse*, c'est-à-dire de sens contraire aux courants d'Ampère qu'on peut substituer par la pensée à l'aimant ou, si l'on veut, au solénoïde équivalent.

Dès qu'on retire le barreau, l'aiguille du galvanomètre indique un courant induit direct.

2° Si l'on place dans la bobine à un seul fil un barreau de fer doux et qu'on en approche, puis qu'on en éloigne un fort aimant, il y a deux courants induits, produits successivement par l'aimantation et la désaimantation successives du fer doux; l'un est *inverse* et l'autre *direct*.

3° On obtient encore des courants induits dans le fil d'un électro-aimant, si, en avant des pôles de celui-ci, on fait tourner un fort barreau aimanté, de manière à produire une aimantation croissante ou décroissante dans les pôles de l'électro-aimant.

4° On peut encore réaliser ces variations de magnétisme en faisant tourner une plaque de fer doux devant les pôles d'un aimant permanent en fer à cheval : si chaque branche est entourée d'une bobine, il s'y produit des courants induits successivement de sens contraires.

De même, on constate qu'un déplacement relativement lent et faible d'un morceau de fer dans le voisinage de cet aimant produit un courant.

Remarque. — L'induction par les aimants est d'accord avec la théorie d'Ampère sur le magnétisme. En effet, les aimants étant de véritables solénoïdes, toutes les expériences ci-dessus s'expliquent par l'induction des courants qui parcourent la surface des aimants, et l'induction par les aimants devient un cas particulier de l'induction par les courants.

1011. **Loi de Lenz.** — En analysant successivement les actions *électrodynamiques* ou électromagnétiques qui prennent naiss

pendant l'induction, il est aisé de voir que *le sens du courant induit est, tel qu'il s'oppose à la continuation de la cause qui lui donne naissance : il agit comme une réaction.* Cette loi générale a été découverte par le physicien russe Lenz.

Remarque. — Nous appelons l'attention sur le fait général que l'induction se produit pendant toute la durée des mouvements ou des variations électriques ou magnétiques inductrices : par conséquent, le courant induit dure en réalité autant que l'on veut et il n'est pas exact de dire qu'il est *instantané.*

1012. **Magnétisme d'Arago** ou **Magnétisme de rotation.** — 1° *Historique.* — Arago observa le premier, en 1824, que le nombre d'oscillations que fait une aiguille aimantée, dans des temps égaux, quand on l'écarte de sa position

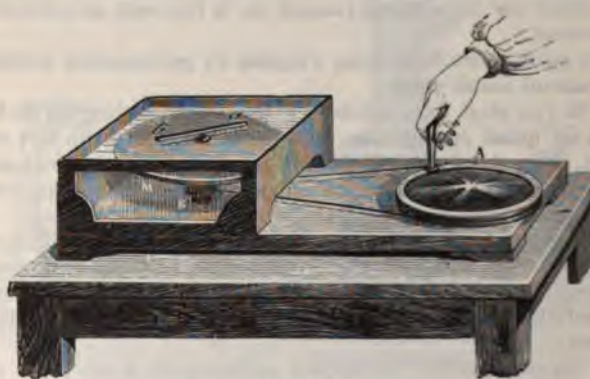


Fig. 910.

d'équilibre, est très affaibli par le voisinage de certaines masses métalliques. Par exemple, une masse de cuivre rouge convenablement placée peut réduire le nombre des oscillations de 500 à 4. Ce fait, qui est une conséquence de la loi de Lenz, alors inconnue, est le principe de l'amortissement des oscillations dans les galvanomètres apériodiques. Le même physicien découvrit, en 1825, un fait d'influence analogue : l'action rotative qu'un disque de cuivre en mouvement exerce sur une aiguille aimantée.

2° *Expérience d'Arago.* — On constate ce phénomène au moyen d'un disque de cuivre rouge M, mobile autour d'un axe vertical (fig. 910) qu'on peut faire tourner plus ou moins vite à la main, à l'aide d'une poulie à manivelle et d'un renvoi. Au-dessus du disque est un carreau de verre fixe, auquel est adapté un pivot qui porte une aiguille aimantée *ab.* Si le disque tourne d'un mouvement lent et uniforme, l'aiguille est déviée dans le sens du mouvement, et s'arrête à 20 ou 30° du méridien magnétique, selon la vitesse de rotation du disque; mais si cette vitesse augmente, l'aiguille finit par dévier de plus de 90° : alors elle est entraînée, effectue une révolution complète et suit le mouvement du disque jusqu'à ce que celui-ci soit arrêté.

3° *Circonstances qui influent sur le phénomène.* — L'effet décroît à mesure que l'aiguille s'éloigne du disque, et varie beaucoup avec la nature de celui-ci; il est maximum avec les métaux de faible résistance électrique; avec le bois, le verre, l'eau, il est nul.

L'effet est très affaibli si le disque présente des solutions de continuité, surtout dans le sens de ses rayons; mais il reprend sensiblement la même intensité si l'on soude les solutions de continuité avec un métal quelconque. Cette observation a une très grande portée pratique. En sectionnant convenablement les masses conductrices des appareils on peut arriver à diminuer beaucoup les courants induits dans leur masse dits *courants de Foucault*, qui échauffent ces conducteurs et absorbent par là une énergie perdue pour le travail mécanique.

4° *Explication du phénomène.* — Arago n'indiqua point la cause de ces phénomènes; c'est Faraday qui, en 1832, a fait voir qu'ils sont dus à des courants d'induction, développés dans les disques par l'influence de l'aiguille aimantée : on doit donc les rattacher à l'*induction magnéto-électrique.*

1013. Induction tellurique. — Faraday a reconnu le premier que le magnétisme terrestre peut développer des courants induits dans des circuits métalliques en mouvement. La terre agit soit comme un puissant aimant central, dirigé parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, soit comme un immense courant électrique, dirigé de l'est à l'ouest, parallèlement à l'équateur magnétique.

1° *Expérience d'Ampère.* — Ampère plaçait une longue hélice de fil de cuivre recouvert de soie dans le plan du méridien magnétique, parallèlement à l'aiguille d'inclinaison; en faisant tourner cette hélice de 180° autour d'un axe qui la traversait en son milieu, il observa qu'à chaque demi-révolution un courant passait dans un galvanomètre qui était en communication avec l'hélice.

2° *Cerceau de Delezenne.* — Delezenne démontra l'induction tellurique à l'aide d'une sorte de machine d'induction, dite *cerceau de Delezenne* (fig. 911). C'est un cerceau de bois RS, de près d'un mètre de diamètre, qui porte un circuit de fils de cuivre enroulés dans une rainure périphérique; il est fixé à un axe *oa*, auquel on peut imprimer un mouvement de rotation au moyen d'une manivelle M. L'axe *oa* est porté par un cadre PQ, mobile lui-même autour d'un axe horizontal. A l'aide d'aiguilles fixées à ces deux axes, un premier cercle gradué *b* indique l'obliquité du cadre PQ, et par suite l'inclinaison de l'axe *oa* sur l'horizon, et un deuxième cercle gradué *c* marque le déplacement angulaire imprimé au cerceau.

L'axe *oa* étant placé dans le méridien magnétique, et le cerceau RS étant perpendiculaire à la direction XY de l'aiguille d'inclinaison, si on lui imprime un mouvement de rotation lent, un galvanomètre relié à la bobine induite indique la production d'un courant induit : la déviation augmente jusqu'à 90°; puis elle décroît et devient nulle quand le cerceau a fait une demi-révolution. Si le mouvement continue, le courant reparaît, mais en sens contraire : il atteint un second maximum à 270°, et devient nul de nouveau après un tour complet.

Si l'axe *oa* est parallèle à l'aiguille d'inclinaison, il ne se produit pas de courant. On obtient ainsi un courant qui change périodiquement de sens si l'on *anime le cerceau d'un mouvement* de rotation uniforme.

L'appareil est muni d'une pièce a, appelée commutateur (1024), qui permet

de *redresser* les courants induits de sens contraire, c'est-à-dire de les envoyer au circuit extérieur toujours dans le même sens.

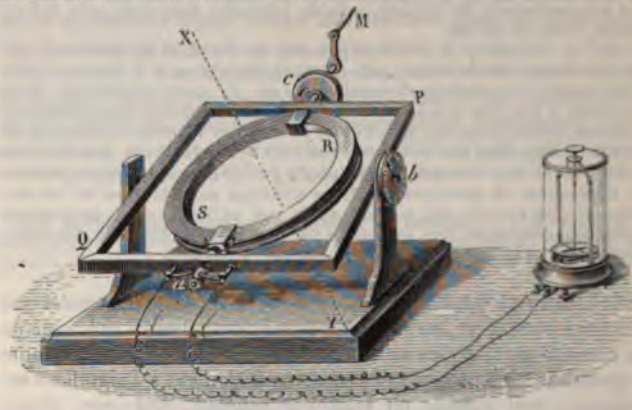


Fig. 911.

1014. Induction leyde-électrique. — On peut aussi produire des courants induits par la décharge d'une bouteille de Leyde. On met en évidence cette induction, dite *leyde-électrique*, à l'aide de l'*appareil de Matteucci*.

Appareil de Matteucci. — Deux plateaux de verre, de 35 centimètres de

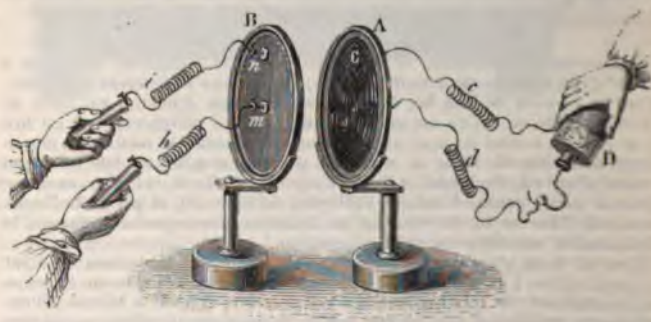


Fig. 912.

diamètre, fixés dans deux cadres de laiton ou d'ébonite A et B (fig. 912), sont portés sur des pieds mobiles qu'on rapproche à volonté. Sur la face antérieure du plateau A est enroulé, en spirale, un fil de cuivre C, de 1 mm de diamètre et de 30 m de longueur. Les deux bouts de ce fil passent au travers du plateau, l'un au centre, l'autre à la partie supérieure, et se terminent à deux pieces

analogues à *m*, *n*, où l'on introduit les deux rhéophores de cuivre *c* et *d* isolés à la soie.

Sur la face du plateau B, en regard de A, s'enroule en spirale un fil de cuivre, plus fin que le fil C. Ses extrémités aboutissent aux pinces *m* et *n*, qui reçoivent deux fils *h* et *i* destinés à transmettre le courant induit. En A et B chaque spire est isolée de la suivante par une épaisse couche de vernis à la gomme laque.

On fait communiquer l'un des bouts du fil *c* avec l'armature extérieure de la bouteille, et l'autre avec le crochet : à l'instant où l'étincelle part, on constate qu'un courant prend naissance dans la bobine du plateau B. Si une personne tient dans les mains deux cylindres de cuivre en communication avec les fils *i* et *h*, elle reçoit une commotion.

1015. **Self-induction** et **Extra-courants**. — Lorsqu'on ouvre un circuit parcouru par un courant, on obtient en général une étincelle, mais qui est à peine sensible si le fil qui réunit les deux pôles est court ; et si l'on se met dans le circuit en tenant une électrode dans chaque main, on ne ressent aucune commotion, à moins que le courant ne soit très intense. Mais si le fil est long, et s'il forme une bobine à spires serrées, l'étincelle d'ouverture acquiert de l'intensité, et l'on reçoit alors une forte commotion.

Faraday a expliqué ce renforcement du courant, au moment de la rupture, par une action inductrice que le courant, dans chaque spire, exerce sur les spires voisines : il en résulte un courant induit direct qui se superpose au courant finissant. Il a prouvé qu'en fermant le circuit on produit également un courant induit, mais *inverse*. Ces courants induits par le courant principal ont été appelés *extra-courants* et le phénomène lui-même est appelé *self-induction*, c'est-à-dire *induction d'un courant sur lui-même*.

1016. **Expériences de Faraday**. — 1° *Extra-courants d'ouverture*. — Les

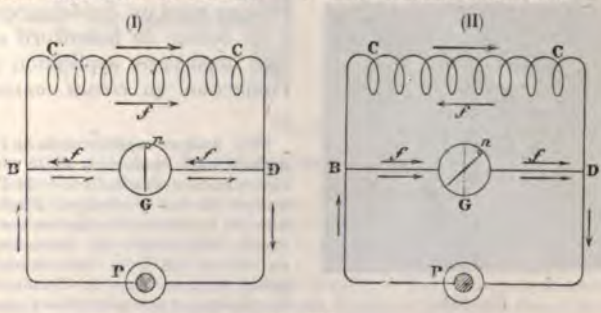


Fig. 913.

rhéophores d'une pile P se rendent (fig. 913, I) aux extrémités d'une bobine à fil *fin f', et en BD est placée* une dérivation qui comprend un galvanomètre G.

Quand le courant passe d'une manière continue, l'aiguille est déviée ; on commence par la ramener au zéro, où on la maintient par un arrêt *n* qui l'empêche de tourner dans le sens primitif, mais qui la laisse libre dans le sens opposé. Or, si l'on rompt le circuit de la pile P, on voit l'aiguille instantanément lancée dans le sens *n*G vers la gauche : donc il est passé dans le galvanomètre un courant *direct*. En effet, le courant de la pile ayant cessé, le seul circuit fermé qui persiste est le circuit CDBC, et puisque dans la partie DB un courant va de D en B, il faut qu'il parcoure tout le circuit dans le sens CBDC, c'est-à-dire dans le même sens que le courant principal. Le courant *f*, qui apparaît ainsi *en dehors* du circuit principal, a donc justement été appelé *extra-courant*.

2° *Extra-courant de fermeture.* — On met à la main l'aiguille en *n*, où l'amènerait le passage continu du courant, et on l'y maintient par un butoir qui l'empêche de revenir au zéro. Quand on établit le courant, l'aiguille est projetée au delà de *n'* vers la droite : donc un courant secondaire de même sens que le courant principal, s'est ajouté à celui-ci pour produire une déviation de l'aiguille supérieure à la déviation normale : c'est l'*extra-courant direct*.

3° Une variation quelconque du courant produit de même un effet d'induction sur ce courant.

1017. **Propriétés des courants induits.** — Les courants induits possèdent toutes les propriétés des courants voltaïques. Comme ceux-ci, ils produisent des effets physiologiques, lumineux, calorifiques, chimiques, et donnent eux-mêmes naissance à de nouveaux courants induits. Enfin, ils font dévier l'aiguille des galvanomètres et aimantent les barreaux d'acier quand on les fait passer dans un fil de cuivre enroulé autour de ces barreaux.

1018. **Induction en circuit ouvert.** — La force électromotrice développée par induction, qui donne naissance aux courants induits, prend naissance dans tous les éléments d'un fil conducteur, que ceux-ci constituent un circuit fermé ou bien un *circuit ouvert*. Ainsi lorsqu'on déplace un morceau de fil AB (fig. 914) en relation avec un électromètre, entre les pôles d'un aimant en fer à cheval, on observe aussitôt une différence de potentiels entre ses extrémités. On peut même charger ainsi un condensateur.

La bobine de Ruhmkorff est une importante application de l'induction en *circuit ouvert*.

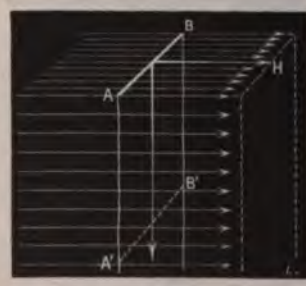


Fig. 914.

1019. **Analyse expérimentale de l'induction.** — 1° *Production de la force électromotrice d'induction.* — Si l'on analyse un cas quelconque d'induction, en considérant exclusivement le champ magnétique de l'inducteur, on voit qu'une force électromotrice prend naissance dans un élément de circuit chaque fois que celui-ci coupe des lignes de force en se déplaçant dans le champ magnétique. Cette force électromotrice a la même durée que ce *déplacement relatif* du champ et de l'élément.

Considérons, par exemple, un conducteur rectiligne AB de longueur l, se

déplaçant avec une vitesse uniforme v dans un champ magnétique constant d'intensité H, de telle façon que la direction du fil et celle de la vitesse soient l'une et l'autre perpendiculaires à la direction du champ magnétique, tout en étant elles-mêmes perpendiculaires entre elles. L'*expérience montre* que, tant que dure le mouvement, le fil est le siège d'une force électromotrice dirigée, dans le cas de la figure 914, de B vers A.

Si les extrémités A et B étaient réunies par un conducteur soustrait à l'induction et ne contenant aucune force électromotrice, le circuit ainsi constitué serait traversé par un courant constant dans le sens AA'B'B. Si le fil est libre, il présente simplement des charges électrostatiques aux extrémités : une positive en A et une négative égale en B. Ces charges cherchent à se neutraliser au travers du fil, et elles sont précisément maintenues par la force électromotrice d'induction qui les a engendrées et qui ensuite fait uniquement équilibre à leur réaction.

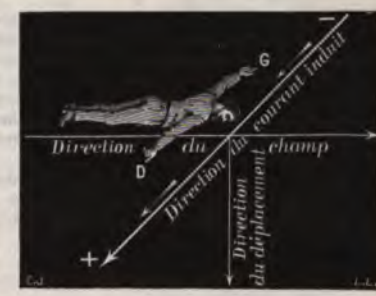


Fig. 915.

2° *Sens de la force électromotrice induite. — Règle du tire-bouchon de Maxwell.* — Pour trouver le sens de cette force électromotrice d'induction, on suppose un observateur couché dans le champ suivant les lignes de force (fig. 915) qui lui entrent par les pieds, et regardant dans le sens du déplacement du conducteur : le courant qui se produirait dans AB, irait de sa gauche à sa droite. Si le circuit n'est pas fermé, l'extrémité voisine de la

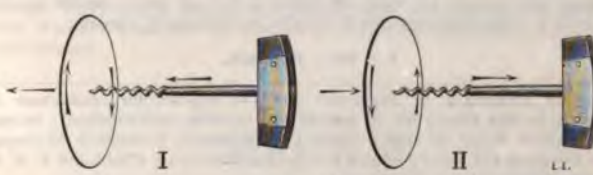


Fig. 916.

main droite se charge simplement d'électricité positive et l'autre extrémité d'électricité négative.

Maxwell a donné la règle pratique suivante : *Le sens de la force électromotrice dans* AB *est celui dans lequel il faut faire tourner un tire-bouchon*, qui serait planté dans l'aire ABA'B' (fig. 914), pour qu'il s'enfonce dans le sens des lignes de force (fig. 916, I et II).

3° *Calcul de la force électromotrice induite.* — Soit i l'intensité du courant produit et R la résistance totale du circuit. D'après la formule de Biot et Savart, l'action électromagnétique qui agit sur l'élément mobile est égal à iHl. Le déplacement de AB en une seconde étant égal à la vitesse v, le moteur extérieur a *dépensé pour le produire* un travail électromagnétique W qui est égal *à* $iHlv$.

Or, si E est la force électromotrice qui produit le courant i, l'énergie électrique correspondante a pour valeur Ei, d'après la définition même de la force électromotrice : on a donc

$$W = Ei, \quad \text{d'où} \quad E = Hlv. \qquad [1]$$

5° *Application à la roue de Barlow.* — En faisant tourner un disque de Barlow (939) de rayon l dont le plan serait perpendiculaire au champ H, avec une vitesse angulaire ω, on aurait $E = \frac{\omega l^2}{2}$ et par suite un courant constant en grandeur et sens. C'est un type de machine à courant continu.

5° *Cas général de la force électromotrice induite.* — Si, au lieu de supposer les directions H, l et v perpendiculaires (comme nous l'avons fait pour simplifier), nous considérons le cas général où les trois composantes ont des directions quelconques, un calcul de travail électromagnétique analogue au précédent prouve que cela revient à les estimer perpendiculairement. Si l'on désigne par α l'angle du conducteur avec le champ, la composante de ce dernier perpendiculairement à AB sera $H \sin \alpha$.

Enfin, si φ est l'angle de v avec la perpendiculaire au plan BAH, la composante effective de v sera $v \cos \varphi$, et l'on aura [2] $E = Hlv \sin \alpha \cos \varphi$.

Si les trois composantes sont perpendiculaires comme nous l'avions supposé tout d'abord, on aura

$$\alpha = 90^\circ, \quad \text{d'où} \quad \sin \alpha = 1; \quad \text{et} \quad \varphi = 0, \quad \text{d'où} \quad \cos \varphi = 1,$$

et l'on retombe sur la première formule.

1020. **Unité C. G. S. électromagnétique de force électromotrice et unité pratique (Volt).** — La formule [1] sert de définition à l'unité de force électromotrice. L'unité C. G. S. électromagnétique de force électromotrice est celle qui est induite dans un conducteur de 1 cm de longueur, se déplaçant avec une vitesse de 1 cm par seconde dans un champ magnétique de 1 unité C. G. S.

Le Congrès des Électriciens de 1881 a adopté pour *unité pratique* une quantité beaucoup plus grande qui vaut 10^8 unités C. G. S. et qu'on appelle le *volt*. D'après cela, si l'on veut exprimer E en volts, la formule [1] s'écrira :

$$E = Hlv \,.\, 10^{-8} \text{ volts.}$$

Exemple numérique. — Supposons que l'on déplace un conducteur de 1,50 m avec une vitesse de 20 mètres par seconde, verticalement, le conducteur étant dirigé de l'est à l'ouest ; la composante horizontale du magnétisme terrestre qui seule produira l'induction étant égale à 0,2 unité C. G. S., la force électromotrice induite sera

$$e = 0{,}2 \,.\, 150 \,.\, 2000 = 60\,000 \text{ [unités C. G. S.]} \quad \text{ou} \quad E = 60\,000 . 10^{-8} = 0{,}0006 \text{ volt}$$

(l doit être exprimé en centimètres et v en centimètres par seconde).

1021. **Loi de Neumann.** — 1° *Énoncé.* — Soit E la force électromotrice, l'intensité du courant induit sera

$$i = \frac{E}{R} = \frac{Hlv}{R};$$

la quantité q d'électricité produite pendant le temps t est donc

$$q = it = \frac{Hlvt}{R};$$

or *lvt* est la surface S décrite par l'élément AB dans le champ magnétique (fig. 914). On a donc

$$q = \frac{HS}{R};$$

d'où la loi suivante, due à Neumann :

La quantité q d'électricité induite par un même déplacement dans un même champ est indépendante de la durée du déplacement.

2° *Vérification expérimentale.* — On fait passer la décharge induite dans un galvanomètre, où les mouvements de l'aiguille sont très visibles, comme le galvanomètre de Bourbouze (fig. 917). L'aiguille reçoit une impulsion qui la dévie d'un certain angle. On démontre que cette impulsion est proportionnelle à la quantité q d'électricité produite, à la condition que la durée d'oscillation de l'aiguille, considérée seule, soit grande par rapport à la durée de la décharge[1]. On vérifiera que la déviation est la même pour la même modification inductrice apportée dans le système, quelle que soit la durée de cette modification.

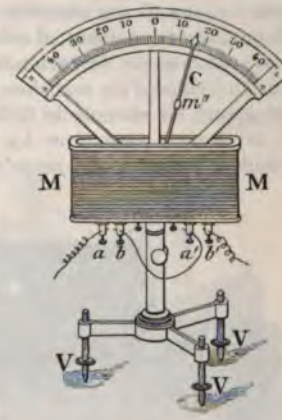


Fig. 917.

1022.— **Coefficient de self-induction et Coefficient d'induction mutuelle.** — Le produit Φs reçoit souvent le nom de *flux coupé* par AB (fig. 914). Le flux, embrassé dans son propre champ par un circuit où passerait l'unité de courant, mesure ce qu'on appelle le *coefficient de self-induction*. Placé dans le champ d'un circuit voisin, parcouru par l'unité de courant, il embrasse un flux qui mesure le *coefficient d'induction mutuelle* des deux circuits.

CHAPITRE XI

APPLICATIONS DE L'INDUCTION VOLTAÏQUE.

BOBINE DE RUHMKORFF ET TRANSFORMATEURS.

1023. **Bobine d'induction de Ruhmkorff.** — Ruhmkorff a construit pour la première fois, en 1851, des bobines d'induction à deux fils, qui sont de véritables *machines à courants induits voltaïques*, et qui ont, en outre, servi de type à une série d'appareils puissants, récemment entrés dans l'industrie électrique, sous le nom de *transformateurs*.

1. *Voir J. Joubert : Traité élémentaire d'électricité.*

1° *Description.* — Les organes essentiels d'une *bobine de Ruhmkorff* sont deux *circuits* ou *bobines*, de dimensions variables suivant la puissance de l'appareil, et un *interrupteur*.

Bobines. — Les deux bobines sont faites en fil de cuivre rouge parfaitement isolé ; l'une en gros fil, de 2 à 2,5 mm de diamètre, et l'autre en fil fin, d'un quart ou d'un tiers de millimètre (fig. 918). C'est le gros fil qui constitue le circuit inducteur ; il a de 40 à 50 mètres de longueur ; il est enroulé le premier sur un cylindre creux de bois ou de carton, qui forme le noyau de la bobine, puis enveloppé d'un manchon de verre ou de caoutchouc isolant sur lequel on enroule le fil fin, qui est le fil induit. La longueur de ce dernier varie avec les dimensions des bobines : dans les grandes, il peut avoir jusqu'à 120 000 mètres de long, et alors

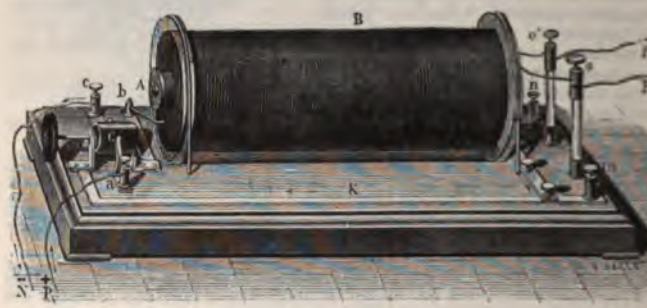


Fig. 918.

son diamètre est moindre que dans les petites bobines ($\frac{1}{6}$ de millimètre au lieu de $\frac{1}{3}$). Afin d'éviter entre deux spires voisines une décharge présentant une grande différence de potentiel capable de percer l'isolant, on enroule souvent le fil induit en galettes successives qu'on juxtapose et qu'on réunit en série après les avoir séparées par des disques isolants. Les bobines ainsi construites sont appelées *bobines cloisonnées*.

Interrupteur à marteau. — Il y a plusieurs modèles d'*interrupteurs*. Le plus simple est l'*interrupteur à marteau* (fig. 919). Il se compose essentiellement d'une pièce de fer mobile *o*, le *marteau*, laquelle oscille entre un électro-aimant A qui l'attire d'une manière intermittente, et une pièce *h*, appelée *enclume*, où elle retombe par son propre poids. L'électro-aimant A est constitué par un faisceau de fils de fer doux, qui forme un

cylindre un peu plus long que la bobine, et c'est le courant inducteur lui-même qui l'aimante d'une manière intermittente[1].

Le courant vient de la pile, par le fil P, à une borne *a* (fig. 918), traverse le *commutateur* C (pièce accessoire, qui sera décrite ci-après), puis par la borne *b* entre enfin dans la bobine à gros fil. Il en sort par le fil *s* (fig. 919), pour gagner l'interrupteur où il suit le circuit *ioh*, fermé en *o* par le contact du marteau et de l'enclume (fig. 918). De là il se rend à la borne *c* par l'intermédiaire d'une lame de cuivre K, et enfin au pôle négatif de la pile par le fil N.

Le faisceau A s'aimante dès que le courant de la pile passe dans le gros fil et le marteau *o* est attiré; mais aussitôt, le contact n'ayant plus lieu entre *o* et *h*, le courant se trouve interrompu, l'aimantation cesse et le marteau retombe; puis, le courant passant de nouveau, la même série de phénomènes recommence, en sorte que le marteau se met à osciller avec une grande rapidité, ouvrant ainsi et fermant tour à tour le circuit : à chaque oscillation, deux forces électromotrices d'induction, successivement directes et inverses, se produisent dans le fil fin et une suite ininterrompue d'étincelles jaillissent entre ses deux extrémités *pp*, suffisamment rapprochées, qui sont les rhéophores de la bobine.

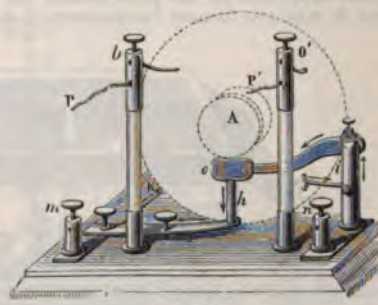


Fig. 919.

Remarque. — On peut vérifier que les deux quantités d'électricité induites dans les deux phases de l'oscillation sont égales, mais que la force électromotrice du courant direct est plus grande que celle du courant inverse (1015). En effet, si l'on place un galvanomètre dans le circuit induit, on ne remarque aucune déviation. Et si l'on écarte les deux rhéophores *pp'* (fig. 918), la résistance de l'air s'opposant au passage des courants, c'est celui qui a le plus de tension, c'est-à-dire le courant direct, qui passe en excès, puis

1. Pour actionner les petites bobines, de 30 à 35 centimètres de longueur, il suffit de 3 ou 4 éléments Bunsen grand modèle; pour les grandes bobines, Ruhmkorff *estimait qu'on doit prendre une surface de pile quatre fois plus grande.*

qui finit par passer seul, jusqu'à une distance limite où il n'y a plus du tout d'étincelles : alors il n'y a plus ni courant inverse ni courant direct ; mais il se produit en P et en P' des potentiels électrostatiques alternativement de sens contraires : c'est l'induction *en circuit ouvert*.

1024. Organes accessoires de la bobine de Ruhmkorff. — *Condensateur de Fizeau.* — M. Fizeau a considérablement augmenté la tension des courants induits en interposant dans le circuit inducteur un *condensateur multiple*. Il se compose de feuilles d'étain superposées et isolées les unes des autres par des feuilles de fort papier *v* (fig. 920), plus larges que l'étain, qu'on a trempées dans une dissolution de résine. De deux en deux, les feuilles d'étain débordent le papier, d'un côté en *e*, *e' e''*... et de l'autre en *s*, *s' s''*... ; les étains de rang impair étant réunis par une pince forment une armature du condensateur, et ceux de rang pair forment l'autre armature. Dans les grandes bobines, la sur-

Fig. 920.

face de chaque armature atteint ainsi 20 mètres carrés. L'une d'elles est en communication avec la borne *i*, qui reçoit le courant à sa sortie de la bobine, et l'autre est en communication avec la borne *m*, qui est reliée elle-même, par la lame K, avec le commutateur C, puis avec la pile. Le condensateur tout entier est renfermé dans le socle de bois qui supporte la bobine.

Pour comprendre l'effet du condensateur, il faut se rappeler qu'à chaque interruption du courant inducteur il se produit un extra-courant direct qui le continue en quelque sorte, prolonge sa durée et, par suite, affaiblit la tension de l'extra-courant d'ouverture. Mais quand le condensateur est intercalé dans le circuit inducteur, cet extra-courant charge d'électricité positive l'armature qui communique avec *i*, et d'électricité négative l'armature qui communique avec *m*. Or ces électricités contraires se recombinant aussitôt, par l'intermédiaire du gros fil de la pile et du circuit CK*m*, donnent naissance à un courant contraire à celui de la pile, lequel désaimante instantanément le faisceau de fer doux : le courant induit est donc plus court, et par suite plus intense. Les bornes *m* et *n* placées à l'extrémité de la planchette servent à recueillir l'extra-courant.

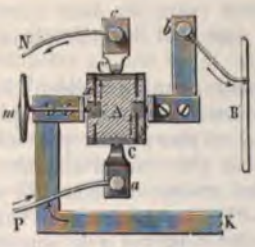


Fig. 921.

2° *Commutateur de Ruhmkorff.* — L'appareil est muni d'un petit *commutateur à main* qui permet soit de changer à volonté le sens du courant inducteur dans la bobine inductrice, soit de l'interrompre brusquement.

Cet organe est tout en cuivre, sauf le noyau central A, qui est un cylindre de buis (fig. 921) ; sur les deux côtés sont fixés deux contacts de cuivre C, C', où s'appuient deux lames élastiques de laiton, liées aux deux bornes *a* et *c*, qui reçoivent les rhéophores de la pile. Le courant de celle-ci arrivant en *a* monte en C ; de là, par une vis *y*, il gagne la borne *b* et la bobine ; puis, revenant par la lame K, qui communique avec le marteau, il va jusqu'en C' par la vis *x*, descend en *c* et retourne à la pile par le fil N. Si à l'aide du bouton *m* on tourne le commutateur de 180 degrés, il est facile de voir que c'est l'inverse qui a lieu : le courant gagne alors le marteau par la lame K et sort en *b*. Enfin si l'on ne tourne que de 90 degrés, les lames élastiques ne s'appuient plus sur les contacts C, C', mais sur le cylindre de buis A, et le courant est interrompu.

1025. **Interrupteur à mercure (de Foucault).** — Dans les grosses bobines, l'interrupteur à marteau oscillant est insuffisant, parce que les surfaces de contact

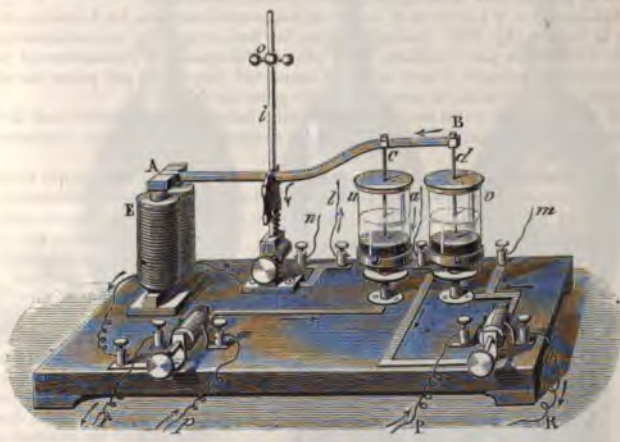


Fig. 922.

s'échauffent alors jusqu'à se souder ; de plus l'étincelle qui jaillit entre l'enclume et le marteau diminue l'instantanéité des interruptions et par conséquent l'intensité des effets. Foucault a imaginé un *interrupteur à mercure* qui ne présente pas cet inconvénient.

Dans deux godets de verre *u* et *v*, contenant du mercure dont la surface est recouverte d'une couche d'alcool (fig. 922), plongent deux tiges de platine *c* et *d*, fixées au même bras d'un levier AB dont l'autre bras porte une armature de fer doux A, sollicitée par un électro-aimant E. Le levier AB est porté par une tige *l*, montée elle-même sur une lame élastique d'acier, qui peut osciller librement à droite et à gauche, en transmettant son mouvement au levier et aux tiges *c* et *d*. La lame et le levier peuvent être soulevés plus ou moins à l'aide d'une crémaillère et d'un pignon. Toutes ces pièces sont montées sur une planchette avec deux commutateurs à main et avec différents conducteurs.

A l'origine, les tiges de platine plongent dans le mercure, et l'on fait arriver par le fil *p*, au commutateur correspondant, le courant d'une petite pile auxi-

liaire, distincte de celle qui produit le courant inducteur. Le courant gagne le godet *u*, le levier BA, la lame d'acier, et de là le fil de l'électro-aimant, d'où il revient au même commutateur, puis à la pile par le fil *r*. L'armature A étant alors attirée, la lame oscille vers A, les tiges *c* et *d* ne sont plus en contact avec le mercure, le courant ne passe plus et l'électro-aimant cesse d'agir; mais la lame élastique oscille aussitôt en sens contraire, les tiges de platine s'abaissent et le courant passe de nouveau. Il se produit de 50 à 60 oscillations par seconde. On peut retarder ou accélérer sa vitesse, en élevant ou en abaissant une masse *o* qui glisse le long de la tige *l*.

Ce sont ces oscillations qu'on utilise pour interrompre le courant inducteur. Celui-ci arrive en P au second commutateur, gagne le godet *v*, la tige *d*, le levier, la lame d'acier, et de là le fil *b*, qui le conduit au gros fil de la bobine. Or on voit que chaque oscillation du levier AB fait sortir la pointe *d* du mercure et produit une interruption dans le circuit inducteur.

Remarques. — 1° Les fils *m* et *n* sont en communication avec les bornes *m* et *n* de la bobine (fig. 918), c'est-à-dire avec les deux armatures du condensateur.

2° L'alcool n'a pas seulement pour effet de s'opposer à l'échauffement par l'étincelle de rupture, il sert encore à empêcher l'oxydation aux points où elle éclate, en supprimant le contact avec l'oxygène de l'air.

3° Il est évident qu'on peut supprimer tout interrupteur et lancer dans le fil inducteur un courant primaire, d'intensité variable provenant d'un *alternateur* quelconque.

1026. Transformateurs : type Zypernowski. — L'énergie électrique qui arrive dans le circuit primaire de la bobine de Ruhmkorff, possède ordinairement une faible force électromotrice et une grande intensité : elle est transformée en énergie électrique qui circule dans le circuit secondaire avec une faible intensité et une grande force électromotrice.

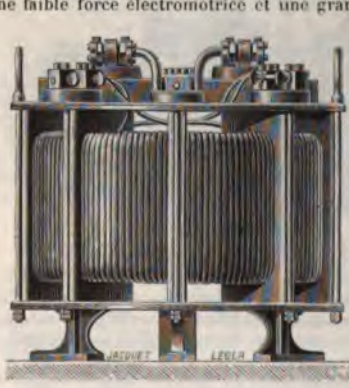


Fig. 923.

En dirigeant au contraire dans le circuit secondaire un courant de faible intensité et de grande force électromotrice on recueillerait dans l'autre circuit un courant de grande intensité et de faible force électromotrice. Le produit E I resterait très sensiblement constant dans la transformation.

Tout appareil capable de transformer ainsi les qualités de l'énergie électrique se nomme *transformateur*.

L'un des plus connus est le type Zypernowski (fig. 923). Il se compose d'un noyau intérieur, formé de disques annulaires en tôle consolidés par des cadres qui, avec les deux plateaux extérieurs en fer, constituent la carcasse de l'appareil. Les bobines sont enroulées sur les segments annulaires entre les cadres. Les extrémités des circuits électriques sont attachées à des bornes fixées au plateau supérieur par l'intermédiaire de disques en porcelaine. Les raccordements avec les fils extérieurs se font par l'intermédiaire de bandes d'étain qui fondent s'il se produit un court circuit.

Dans d'autres types, les circuits primaire et secondaire sont entrelacés

manière à former l'anneau ; le noyau de fer est alors constitué par un fil enroulé sur cet anneau.

1027. Effets de la bobine de Ruhmkorff. — La bobine de Ruhmkorff peut produire des effets *physiologiques*, *calorifiques*, *chimiques*, *lumineux* et *mécaniques* analogues à ceux d'une batterie électrique extrêmement puissante.

Effets physiologiques. — Ils sont tellement intenses, que les commotions des bobines moyennes, même quand le courant inducteur provient d'un seul couple de Bunsen, sont déjà insupportables. Avec deux couples de Bunsen on tue un lapin, et avec un grand nombre de couples un homme serait foudroyé.

Effets calorifiques. — On les constate aisément en interposant entre les

Fig. 924. Fig. 925. Fig. 926.

rhéophores P, P' (fig. 918) un fil de fer très fin : celui-ci est fondu et brûle avec une vive lumière. Ils ont été utilisés dans la fusée Stateham (1029).

Effets lumineux. — Ces effets sont très variés, suivant qu'ils ont lieu à la pression ordinaire, ou dans des gaz très raréfiés, ou dans des vapeurs à très faible tension.

Dans l'air, ils consistent en une série d'étincelles vives et bruyantes, dont la longueur va jusqu'à 45 centimètres avec la grande bobine de 65 centimètres de longueur.

Dans l'air très raréfié, les effets sont fort remarquables. On les réalise aisément en reliant les rhéophores P et P' de la bobine avec les deux tiges de l'œuf électrique déjà décrit. Dans le vide à 1 ou 2 mm, on voit une belle

traînée lumineuse se produire d'une boule à l'autre, d'une manière sensiblement continue (fig. 926). Si l'on approche alors la main de l'œuf, on produit (fig. 924) par influence une déviation de la lumière électrique.

C'est le pôle positif du courant induit qui présente le plus d'éclat ; sa lumière est rouge de feu, tandis que celle du pôle négatif est faible et violacée ; de plus, cette dernière se prolonge tout le long de la tige négative, phénomène qui ne se produit pas au pôle positif (fig. 925).

Effets mécaniques. — On peut aussi produire des effets mécaniques puissants. Avec la grande bobine de 65 centimètres on perce une masse de verre de 5 centimètres d'épaisseur. La plaque à percer V est alors disposée comme le montre la figure 927.

Dans le cas où la plaque de verre à percer V présenterait une trop grande résistance, il est à craindre que l'étincelle n'éclate dans la bobine même en trouant la couche isolante qui sépare les fils, et alors la bobine serait mise hors d'usage. Pour éviter cet accident, deux fils *e* et *c* mettent les pôles de la bobine

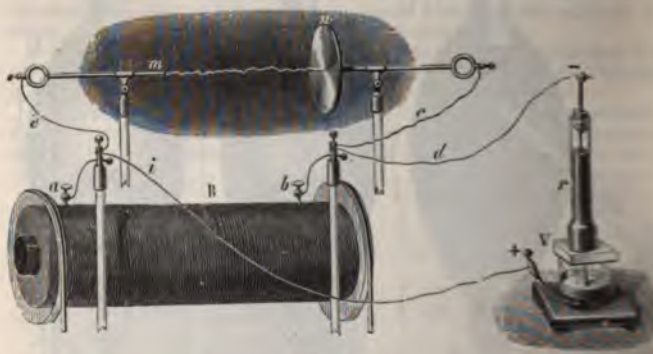


Fig. 927.

en communication avec deux tiges métalliques horizontales, plus ou moins espacées l'une de l'autre. Alors, si l'étincelle ne peut éclater en V en trouant le verre, elle éclate de *m* en *n*, et la bobine est préservée.

Effets chimiques. — MM. Ed. Becquerel et Fremy ont constaté les effets chimiques de la bobine de Ruhmkorff en faisant éclater les étincelles entre les extrémités de deux fils de platine traversant les parois d'un tube de verre plein d'air et hermétiquement fermé. On trouve ainsi que l'azote et l'oxygène de l'air se combinent lentement, en donnant naissance à de l'acide nitreux. Dans ce cas, les effets chimiques de l'étincelle sont compliqués d'effets calorifiques et d'effets mécaniques. Cet inconvénient disparaît dans la décharge silencieuse, dite *effluve électrique*.

Charge des batteries. — La bobine de Ruhmkorff peut aussi être utilisée pour charger des bouteilles de Leyde, et même des batteries de plusieurs jarres. Il est nécessaire alors de ménager, sur l'un des fils qui fait communiquer les armatures de la batterie avec les pôles de la bobine, une interruption qui ne livre passage qu'au courant direct. En reliant d'autre part la batterie aux deux tiges d'une bouteille de Lane, on peut mesurer le débit des bobines de Ruhmkorff, dans des conditions définies.

1028. Effluve électrique. — On nomme *effluve électrique* le passage silencieux, et sans chaleur apparente, de l'électricité à travers un milieu gazeux.

I. *Effets chimiques de l'effluve — Expériences de M. Berthelot.* — En passant à travers les gaz sous la forme d'effluve, l'électricité donne naissance à des réactions chimiques remarquables, qui dépendent beaucoup de la forme sous laquelle agit la décharge. M. Berthelot a fait une étude approfondie de ces effets et en a découvert les lois expérimentales.

II. *Effets lumineux.* — 1° *Tubes de Geissler.* — Lorsqu'on fait passer la décharge de la bobine dans des tubes de verre contenant une vapeur ou un gaz très raréfié, la lumière électrique apparaît sous la forme de zones (ou *strates*) alternativement brillantes et obscures, formant comme une pile de lumière entre les

Fig. 928.

deux électrodes. Ces phénomènes, qui ont été étudiés par Masson, Grove, Gassiot, Plücker, etc., se produisent dans des tubes fermés, de verre ou de cristal, construits pour la première fois par Geissler. On y introduit un gaz ou

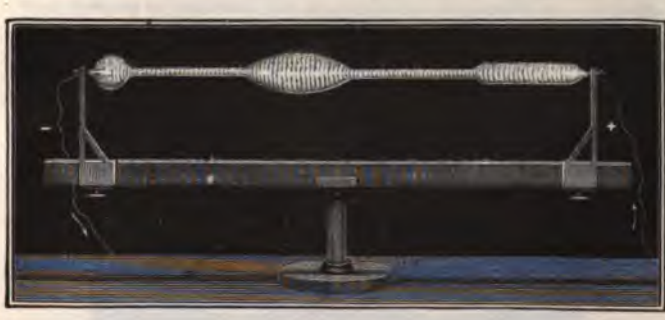


Fig. 929.

une vapeur; puis, avant de les fermer, on y fait le vide, à un demi-millimètre. Aux deux extrémités des tubes sont soudés deux fils de platine qui y pénètrent de 1 à 2 centimètres, et qu'on fait communiquer avec les pôles de la bobine de Ruhmkorff. Les stries lumineuses varient de forme, de couleur et d'éclat, avec le degré de vide, la nature du gaz ou de la vapeur, et les dimensions des tubes. Souvent le phénomène prend encore un plus bel aspect par la fluorescence que la décharge électrique excite dans le verre.

La figure 928 représente les stries données par l'hydrogène, à un demi-millimètre de pression dans un tube alternativement renflé et étroit : dans les boules, la lumière est blanche ; dans les parties capillaires, elle est rouge.

La figure 929 montre les stries dans l'acide carbonique à un quart de millimètre de pression : la couleur est verdâtre, et les stries n'ont pas la même forme que dans l'hydrogène. Dans l'azote, la lumière est jaune-rouge.

2° *Expériences de Crookes.* — Les expériences de Crookes sur le bombardement moléculaire par les décharges électriques dans un gaz extrêmement raréfié se réalisent facilement avec la bobine Ruhmkorff, dont il suffit de relier les pôles aux fils de platine soudés dans les parois de l'ampoule de verre dans lequel on a fait le vide à la trompe de Sprengel.

3° *Expériences de Plücker.* — Plücker a vérifié que la lumière des tubes de Geissler ne dépend pas de la substance des électrodes, mais de la nature du gaz ou de la vapeur qui est dans le tube. Il a constaté aussi que les lumières fournies par l'hydrogène, l'azote, l'acide carbonique, etc., examinées au spectroscope, fournissent des spectres très différents.

1029 **Application de la bobine de Ruhmkorff. — Fusée de Statcham.** — Lorsqu'un fil de cuivre AB (fig. 930) est recouvert de gutta-percha sulfurée,

Fig. 930.

il se forme au bout de quelques mois, au contact du métal et de son enveloppe, une couche de sulfure de cuivre qui suffit pour conduire le courant. En effet, si, en une partie quelconque du circuit, on coupe la moitié supérieure de l'enveloppe, puis que, dans l'échancrure *ab* ainsi formée, on enlève un morceau du fil de cuivre de 6 millimètres de longueur, un courant intense lancé dans ce fil, interrompu, passe pourtant par le sulfure qui adhère à la gutta et le fait entrer en ignition. Et si, dans la cavité ainsi creusée, on met du coton-poudre ou de la poudre à canon, — comme l'a fait l'ingénieur Statcham, — ce corps prend feu dès qu'on lance le courant : de là le nom de *fusée de Statcham* donné à ce dispositif.

Au lieu du courant intense d'une pile très puissante, on peut employer une bobine de Ruhmkorff. La décharge de la bobine entre les points *a* et *b* suffit pour enflammer la fusée. On l'utilise dans l'industrie ou dans l'art militaire pour mettre le feu aux mines à grande distance.

CHAPITRE XII

NOUVELLES APPLICATIONS DE L'INDUCTION. — EFFETS DE CAPACITÉ ET DE SELF-INDUCTION : DÉCHARGES OSCILLANTES.

1030. **Décharges oscillantes. — Définitions.** — La théorie de l'induction, appliquée à la décharge des condensateurs, montre que cette décharge peut être *continue*, c'est-à-dire de sens constant, ou bien *oscillante*. Cela dépend de la capacité du condensateur ainsi que de la résistance et de la self-induction du circuit de décharge. On peut représenter par une courbe caractéristique (fig. 931) l'allure de la décharge oscillante : les temps sont portés en abscisses et les intensités en ordonnées.

Fig. 931.

On voit que l'oscillation est constituée par deux décharges successives de sens contraires, et que cet aller et ce retour du courant ont une *durée constante*, tandis que l'intensité maxima de chaque oscillation va en diminuant de plus en plus. On observe un phénomène analogue en établissant, par aspiration ou compression, une dénivellation dans les deux branches d'un tube en U contenant un liquide et en l'abandonnant à lui-même : celui-ci ne reprend sa position d'équilibre qu'après une série d'oscillations à amplitudes progressivement décroissantes.

1031. **Expériences de Feddersen et de M. Lodge.** — Si on examine au moyen d'un miroir tournant l'étincelle produite par une telle décharge, on aperçoit en effet une série de traits lumineux parallèles et distincts dont l'éclat va en diminuant. Ce mode d'étude est dû à Feddersen. La période de la décharge est variable avec les circonstances de l'expérience.

Fig. 932.

M. Lodge, en modifiant convenablement la capacité du condensateur, la résistance et la self-induction du circuit de décharge, a obtenu une gamme de vibrations électriques dont les périodes s'étendaient de *un cent-millionième à un cinq-centième* de seconde.

1032. Expériences de M. Paalzow. — M. Paalzow, en opérant la décharge dans un tube de Geissler disposé parallèlement aux pôles d'un électro-aimant, a mis nettement en évidence la nature oscillante de la décharge.

En effet, les deux pôles, en agissant sur la lueur qui traverse le tube, produisent sur les deux moitiés de celle-ci une action contraire et lui donnent la forme d'un S (fig. 932). Si la direction de la lueur change de sens, il en sera de même de l'S, parce que la partie déviée vers le haut se trouvera alors déviée vers le bas. La succession rapide des décharges, dirigées alternativement dans un sens et dans l'autre, donnera donc lieu à un 8 lumineux, dont tout un auditoire peut à la fois constater l'existence.

1033. Expériences de M. Hertz. — Les oscillations électriques produites, ainsi qu'il vient d'être expliqué, se propagent dans l'air ambiant comme le feraient des ondes sonores.

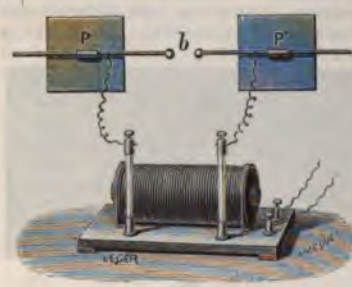


Fig. 933.

Pour le démontrer, on peut se servir de l'un des appareils imaginés par M. Hertz (fig. 933). La capacité est constituée par deux plaques rectangulaires en cuivre PP' munies de tiges métalliques, dont on peut à volonté rapprocher les boules extrêmes *b*. Elle est chargée au moyen d'une bobine de Ruhmkorff. La décharge oscillante s'opère entre les boules *b*. En explorant l'espace au moyen d'un conducteur spécial, constitué soit par un fil recourbé en cercle et présentant une petite interruption (fig. 934), soit par un fil rectiligne interrompu en b_1 (fig. 935), on constate que des étincelles jaillissent dans l'interruption b_1 lorsque la distance des deux boules de l'appareil est convenablement réglée.

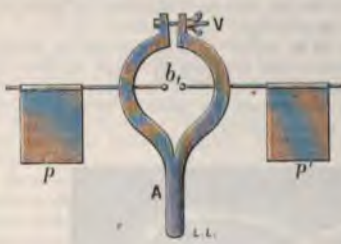


Fig. 935.

Fig. 934.

Ces appareils, qui révèlent les ondes électriques comme les résonateurs d'Helmholtz manifestent les ondes sonores, ont été nommés, par analogie, *résonateurs électriques*.

Dans le résonateur Vb_1 (fig. 935) le jeu de la vis V permet de diminuer ou d'augmenter l'interruption. De plus, on en peut faire varier la capacité en suspendant des feuilles d'étain *p* et *p'* aux deux branches.

Réflexion et interférence des ondes électriques. — Les ondes électriques sont arrêtées par une surface conductrice en communication avec le sol. Au lieu de continuer leur route, elles sont réfléchies vers leur direction première; elles peuvent alors interférer avec les ondes incidentes, d'après le même mécanisme que celui qui a été exposé en acoustique et en optique.

Réfraction des ondes électriques. — M. Hertz a également mis en évidence la réfraction des ondes électriques en se servant d'un grand prisme en asphalte de 30°.

1054. Expériences de M. Tesla. — M. Tesla a également réalisé des expériences des plus curieuses sur les décharges oscillantes à l'aide d'un dispositif spécial. — Ce dispositif (fig. 956) se compose d'une bobine Ruhmkorff R à vibrateur, alimentée soit par une batterie d'accumulateurs, soit autrement. Cette bobine charge une bouteille de Leyde ordinaire, ou une batterie C, dont la décharge oscillante s'effectue à travers quelques spires d'un gros fil. Cette décharge induit alors un courant oscillant de courte période, dans un fil long et fin *b* enroulé sur un manchon de verre suivant l'axe duquel est enfilé le circuit inducteur. La bobine, construite d'après le modèle d'Elihu Thomson,

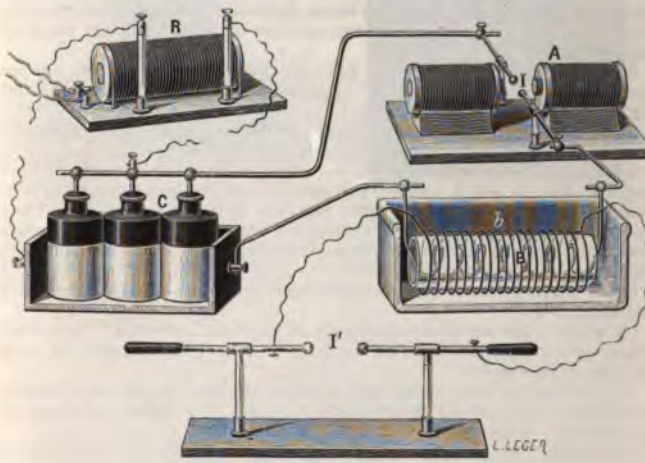


Fig. 956.

est plongée dans une auge rectangulaire en verre pleine d'huile à graisser les machines. Les extrémités du circuit à fil fin sont en I', le circuit de décharge porte une interruption I placée entre les pôles d'un puissant électro-aimant, lequel a pour fonction de souffler l'étincelle. Voici les principales expériences :

1° M. Tesla réalise les mêmes effets que Crookes en reliant une ampoule vide à *l'un seulement* des pôles de la bobine de décharge.

2° En enfermant dans l'ampoule un filament de charbon ou de platine, et plus généralement un corps quelconque, il constitue une véritable lampe électrique *unipolaire*.

3° En terminant le filament par une sphère de charbon ou mieux par une petite coupe pleine de substances phosphorescentes, fragments de rubis, blende hexagonale, yttria, sulfure de calcium, carburendum, etc., il obtient *une illumination très vive*.

4° *Par l'approche* de la main on augmente la capacité de la lampe, et par *suite son éclat. On produit* l'effet d'un abat-jour en coiffant l'ampoule d'une

feuille métallique à laquelle on peut donner la forme d'un chapeau de lampe si l'on veut compléter l'illusion.

5° *L'illumination d'un tube raréfié sans électrodes* est l'expérience la plus typique de la série ; voici comment la réalise M. Tesla :

Une feuille de métal d'environ 5 mètres de longueur et 0,35 m de largeur, suspendue à 2,5 m au-dessus du sol, est reliée à l'un des pôles de la bobine; l'autre pôle communique avec le sol. Dans tout l'espace compris entre le sol et la feuille métallique, la bobine entretient un champ électrostatique vibratoire dont les lignes de force sont sensiblement verticales. Si on prend un tube raréfié à la main — ceux employés par M. Tesla avaient environ 1 m de longueur — et qu'on le dispose parallèlement aux lignes de force, il *s'illumine dans toute sa longueur d'une lueur blafarde*. Si l'on incline le tube de plus en plus, l'éclat diminue, et il s'annule complètement lorsqu'on le dirige perpendiculairement aux lignes de force du champ. On éteint également le tube par l'interposition d'un écran médiocrement conducteur, ou bien en le saisissant par ses deux extrémités.

Si l'on rapproche l'une des mains de l'autre, toute la partie du tube comprise entre les deux mains reste obscure : la portion libre s'illumine seule d'un éclat d'autant plus vif qu'elle est plus courte.

En supprimant l'armature métallique on peut encore illuminer le tube, mais il faut approcher la main libre de l'un des pôles de la bobine.

Application. — On conçoit qu'en disposant en face l'une de l'autre deux larges feuilles de métal, placées, par exemple, sur les deux façades opposées d'une rue, et reliées respectivement aux deux pôles de la bobine, des tubes raréfiés dirigés transversalement s'illumineraient : il n'en faut pas davantage pour faire penser à un nouveau mode d'éclairage ou au moins à un nouveau mode de communication à distance.

6° Les décharges dans l'air atmosphérique présentent aussi d'intéressantes particularités.

On produit une aigrette volumineuse et continue, présentant l'apparence d'une véritable flamme, sur l'un des pôles en reliant l'autre pôle à un corps de capacité convenable.

En terminant les fils secondaires de la bobine par deux disques entre lesquels on intercale une plaque d'ébonite, celle-ci, au lieu de s'opposer au passage de la décharge, l'augmente et s'échauffe sous son action.

Citons enfin l'irradiation sur toute leur longueur de fils nus ou recouverts d'un isolant, fixés aux pôles de la bobine.

1055. — **Effets physiologiques des décharges oscillantes.** — Une des particularités les plus imprévues de ces décharges oscillantes à très courte période, c'est qu'elles sont *sans action* sur l'organisme : on peut *impunément* saisir les deux pôles de la bobine. Toutefois il est bon de toucher les bornes au moyen de masses métalliques que l'on tient dans chaque main, afin d'éviter les brûlures par les étincelles qui jaillissent au moment du contact.

Remarque. — *Expériences de M. d'Arsonval.* — M. d'Arsonval avait fait connaître déjà en France cette propriété inattendue des décharges à grande fréquence.

1056. **Expériences d'Elihu Thomson.** — M. Elihu Thomson a mis en évidence l'influence du coefficient de self-induction par une nouvelle expérience non moins curieuse que les précédentes.

Une bobine B (fig. 937), alimentée par un courant alternatif, est entourée par un anneau en cuivre ou mieux en aluminium. On constate alors, non seulement l'échauffement de l'anneau ou l'illumination d'une lampe intercalée dans le circuit d'une spire de fil, — ce qui est une conséquence immédiate de l'induction, — mais encore une répulsion de l'anneau. Si l'induction suivait exactement le courant inducteur (fig. 938) il y aurait, au cours d'une période, une répulsion moyenne égale à l'attraction moyenne : d'où il suit que l'anneau reste

rait en repos. Or la self-induction résistant à l'établissement du courant dans l'anneau donne lieu à un retard, à un décalage entre les deux courants, si bien que la durée de la répulsion se trouve augmentée par rapport à celle de l'attraction. Les parties hachées de la figure 938, qui repré-

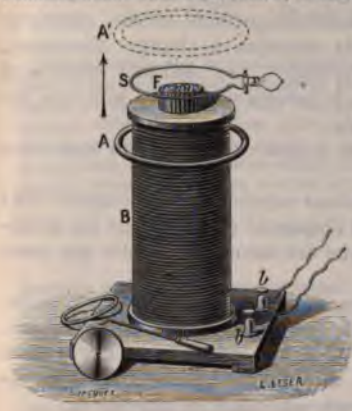


Fig. 937.

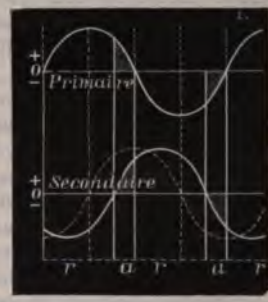


Fig. 938.

sente les intensités, au même instant, des courants inducteur et induit, correspondent en effet à l'attraction, c'est-à-dire à un accord de sens entre les courants alternatifs, inducteur et induit.

CHAPITRE XIII

APPLICATIONS DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME ET DE L'INDUCTION.

—

MACHINES ET MOTEURS ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

1037. Définitions. — On comprend sous le nom général de *machines électromagnétiques* des appareils qui transforment le travail mécanique en énergie électrique par l'intermédiaire de l'induction magnéto-électrique : suivant que l'induction est produite par des aimants permanents ou par des électro-aimants, les machines sont appelées *magnéto-électriques* ou *dynamo-électriques*. Les courants fournis peuvent être *alternatifs* ou *continus*.

Dans le premier cas, les courants se succèdent, *alternativement directs et inverses*. Les appareils qui engendrent ces courants sont appelés *machines à courants alternatifs*[1] ou souvent *alternateurs*.

1. On dit indifféremment machine *à courants alternatifs* ou *à courant alter-*

On peut s'arranger pour diriger les courants toujours dans le même sens dans le circuit extérieur. Il suffit de munir la machine d'un *commutateur* qui change automatiquement le sens extérieur du courant chaque fois que la machine le change elle-même, c'est-à-dire à toutes les demi-périodes. Les courants traversent alors le circuit extérieur dans le même sens, mais avec une intensité variant continuellement.

Les machines pourvues de ce système commutateur sont dites *à courants redressés*.

Les machines *à courants continus* engendrent des courants dont le sens ne change pas et dont l'intensité est constante (ou pratiquement telle). Ils jouissent donc des mêmes propriétés que ceux qui sont fournis par les piles.

Les *moteurs électromagnétiques* sont des machines qui transforment, au contraire, l'énergie électrique en travail mécanique. Cette transformation inverse peut s'opérer à l'aide des mêmes organes que la transformation directe : ce qu'on exprime en disant que les machines électromagnétiques sont *réversibles*.

1058. Généralités sur les courants alternatifs. — *Période* et *Fréquence*. — Les deux courants opposés successifs varient respectivement suivant une loi représentée par un sinus, et reprennent périodiquement la même valeur et le même sens. Le courant partant de l'intensité zéro, par exemple (fig. 939), croît jusqu'à un certain maximum, décroît ensuite, change de sens en passant par zéro, reprend la même valeur maxima, mais en sens contraire, puis revient à zéro. Le temps qui s'écoule entre deux retours du courant au même état s'appelle la *période*. On nomme *fréquence* d'un courant alternatif le nombre de *périodes par seconde*. Cette fréquence varie de 40 à 135 périodes par seconde dans les types employés généralement. Un diapason qui vibrerait synchroniquement avec le courant de cette dernière machine donnerait une note voisine de l'*ut*$_2$.

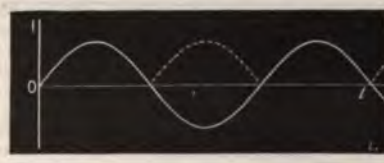


Fig. 939.

La figure 939 représente, par le trait plein, un courant alternatif sans redressement, et, par la ligne ponctuée, un courant redressé.

Intensité moyenne et force électromotrice moyenne. — Il est clair que l'on ne peut pas parler de l'intensité d'un courant alternatif sans préciser l'instant auquel on la considère. La quantité d'électricité induite pendant une demi-période (fig. 939) est égale à $\sum I\Delta t$, c'est-à-dire à l'aire limitée par la courbe et l'axe des temps entre deux zéros consécutifs. Cette aire, divisée par la durée de la demi-période, donne la valeur de ce que l'on appelle l'*intensité moyenne natif*. La dernière expression donne l'idée de la continuité de l'effet, bien que la valeur et le sens changent.

du courant alternatif. Pour un courant sinusoïdal (fig 939), on trouve

$$I_{moy} = \frac{2 I_{max}}{\pi}. \qquad \text{On a de même} \qquad E_{moy} = \frac{2 E_{max}}{\pi}.$$

Intensité efficace et force électromotrice efficace. — Il est préférable d'introduire la notion d'*intensité efficace* et de *force électromotrice efficace*. Si l'on portait en ordonnées (fig. 939), non plus l'intensité I, mais son carré I^2, le produit $r\Sigma i^2 dt$ de l'aire d'une spire par la résistance du circuit représenterait la chaleur dégagée dans le circuit. L'intensité d'un courant constant, qui produirait dans le circuit le même dégagement de chaleur en un même temps, se nomme *intensité efficace* du courant alternatif. Pour un courant sinusoïdal

$$I_{eff} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}, \qquad \text{on a de même} \qquad E_{eff} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}}.$$

Quand on parle, sans préciser davantage, de l'intensité et de la force électromotrice d'un courant alternatif, il faut sous-entendre qu'il s'agit de l'intensité et de la force électromotrice efficaces.

1039. **Machine de Clarke.** — Le premier appareil de ce genre qui ait été réalisé sous une forme pratique est la machine de Clarke. Elle a été le point de départ et le modèle de toutes les autres. Nous allons d'abord la décrire en détail.

1° *Historique.* — *Machine de Pixii.* — La découverte de l'induction, par Faraday, date de 1830. Dès 1832, Pixii, constructeur d'instruments de physique à Paris, combina un ingénieux appareil pour réaliser les expériences de Faraday. Ce fut la première des machines magnéto-électriques; celle de Clarke ne fut qu'un perfectionnement de celle-ci.

L'appareil de Pixii se composait d'une double bobine de fils de cuivre, en forme d'électro-aimant, qui était fixée verticalement à un bâti en bois, et d'un gros aimant permanent, en fer à cheval, disposé pour tourner pôle contre pôle devant les noyaux de la bobine. Enfin il était muni d'un petit *commutateur*, destiné à *redresser* les courants induits alternatifs.

Machine de Saxton. — La pratique démontra bientôt qu'il était inutile de prendre une bobine induite aussi lourde que celle de Pixii, tandis qu'il y avait avantage à augmenter la masse et, par suite, le champ de l'aimant inducteur. D'autre part, en renversant la proportion des poids des deux organes, inducteur et induit, il était naturel d'en renverser le mécanisme, en fixant le plus lourd et mobilisant le plus léger. C'est ce que fit Saxton. Il combina un nouveau modèle de machine à bobines horizontales, pouvant tourner devant les pôles d'un aimant fixe et couché horizontalement bout à bout. Clarke réalisa le même perfectionnement en prenant aussi une bobine mobile et horizontale, mais un aimant fixe, placé non plus bout à bout, mais verticalement.

2° *Description.* — L'aimant inducteur est un faisceau aimanté A (fig. 940) recourbé en fer à cheval; il est appliqué verticalement le long d'une planchette. En avant se trouve la *double* bobine induite B, B', mobile autour d'un axe horizontal. Les deux moitiés de ce circuit sont enroulées sur deux cylindres de fer doux,

reliés entre eux, à l'extrémité antérieure, par une épaisse plaque de fer doux V, et à l'autre extrémité, en regard de l'aimant, par une plaque de laiton. A cette dernière est fixé l'axe de la bobine, muni d'une poulie qui est actionnée au moyen d'une courroie sans fin par une grande roue R à manivelle. Il se prolonge antérieurement par un cylindre en cuivre, fixé à la plaque de fer doux et portant le *commutateur*.

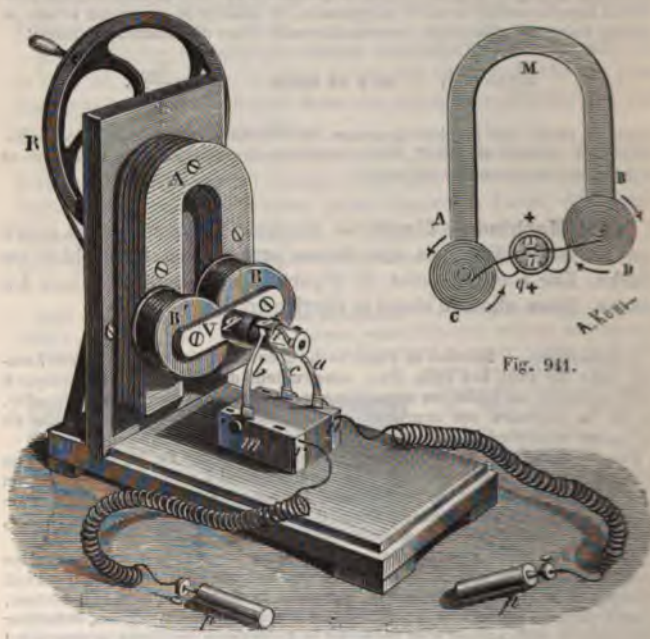


Fig. 941.

Fig. 940.

Chaque bobine est formée d'un fil de cuivre très fin, recouvert de soie, et faisant jusqu'à 1500 tours. Les deux bouts antérieurs des fils des bobines viennent se souder à l'axe (fig. 941), et les deux autres bouts à une virole de cuivre *q*, qui est fixée à cet axe, mais en est isolée par un cylindre d'ivoire J. Pour que le courant induit soit de même sens dans les bouts qui se réunissent, on a soin d'enrouler les fils en sens contraires sur les deux bobines.

3° *Génération du courant.* — Les courants qui se développent dans les bobines B, B′ sont dus à deux causes : 1° à l'induction magnéto-électrique par déplacement ; 2° à l'induction magnéto-électrique par variation de magnétisme. Cette dernière est de beaucoup la plus puissante.

Suivons l'une des bobines, B par exemple, dans son mouvement devant les pôles du faisceau aimanté. Convenons de représenter par *a* et *b* les pôles de celui-ci, et par *a′* et *b′* ceux que prend successivement l'extrémité du noyau de fer. Considérons l'instant où la bobine vient de passer devant le pôle nord *a*

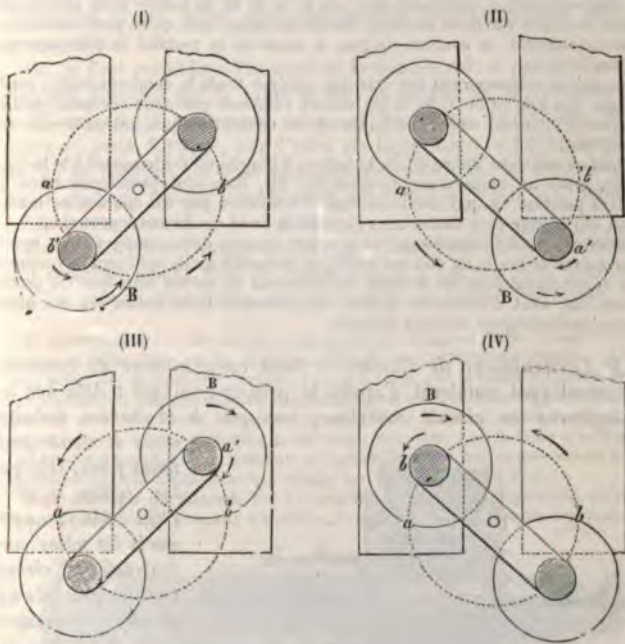


Fig. 942.

du faisceau (fig. 942, I) ; l'extrémité du noyau voisine du pôle nord de l'aimant possède alors un pôle sud dans lequel les courants d'Ampère sont dirigés dans le sens des aiguilles d'une montre[1]. Ces courants induisent dans le fil de la bobine des courants directs ; car, la bobine s'éloignant du pôle *a*, l'intensité de son magnétisme (ou de ses courants particulaires) va en décroissant d'une manière continue ; le courant induit garde donc toujours le même

1. C'est le contraire qui est indiqué par la flèche *b′*, parce que les bobines sont vues ici comme dans la figure 940, c'est-à-dire par derrière et non par devant : c'est *en les regardant* par le bout qui rase l'aimant que les courants *d'Ampère paraîtraient tourner* dans le sens des aiguilles d'une montre.

sens, jusqu'à ce que la droite qui joint les axes des bobines soit perpendiculaire à la ligne des pôles *a* et *b* du faisceau. A partir de ce moment, le noyau s'approche du pôle *b*, et il s'aimante en sens contraire, et l'extrémité, qui était sud pendant le premier quart de révolution, devient un pôle nord *a'* (fig. 942, II). Or les courants d'Ampère sont alors dirigés dans le sens de la flèche *a'*, et comme ils commencent, ils développent dans le fil de la bobine un courant induit inverse, lequel se trouve être de même sens que le précédent. De plus, ce second courant se superpose au premier, puisque, en même temps que la bobine s'éloigne de *a*, elle s'approche de *b*. En résumé, pendant la demi-révolution inférieure de *a* en *b*, le fil de la bobine a été successivement parcouru par deux courants induits de même sens qu'on peut considérer comme formant un courant unique, à cause de la rapidité de leur superposition.

Le même raisonnement fait voir que pendant toute la demi-révolution supérieure (fig. 942, III et IV) le fil est encore parcouru par deux courants induits successifs de même sens et ne faisant qu'un courant unique, qui est inverse du précédent.

Tout ce qui vient d'être dit de la bobine B s'applique évidemment à la bobine B' et, grâce au mode d'enroulement des fils, elles sont parcourues l'une et l'autre pendant chaque demi-révolution inférieure par un courant de même sens, qui change pour toutes deux pendant la demi-révolution supérieure.

Remarque. — En considérant les aimants comme des solénoïdes et en appliquant dans ce cas la loi de Lenz (1011), on reconnaît qu'ils induisent eux-mêmes par déplacement dans les bobines des courants de même sens que les précédents. Cet effet d'induction directe se rencontre dans toutes les machines magnéto-électriques décrites ci-après.

4° *Commutateur de Clarke.* — Tout *commutateur* de courants alternatifs est construit d'après le principe suivant : *Attacher les rhéophores du circuit extérieur, non pas à la bobine induite, mais à deux frotteurs fixes, tels que les lames* b *et* a (fig. 940), *auxquels les pôles contraires du circuit induit viennent s'appliquer successivement à chaque inversion du courant.* On a construit un grand nombre de commutateurs qui sont tous des variétés du commutateur de Clarke. Il se compose d'un cylindre isolant d'ivoire ou de buis J, dans l'axe duquel il y a un cylindre de cuivre *k* (fig. 943), d'un moindre diamètre, fixé à l'armature V et tournant avec les bobines. Sur le cylindre d'ivoire il y a d'abord une virole de laiton q; puis, plus en avant, deux demi-virole

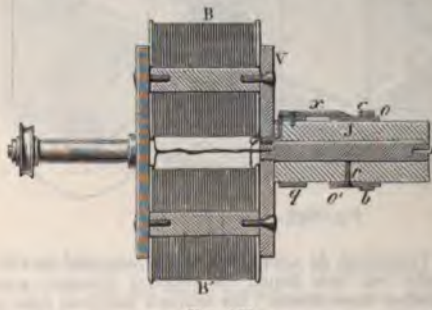


Fig. 943.

o, *o'*, de laiton, complètement isolées l'une de l'autre. La demi-virole *o'* communique avec l'axe *k* par une vis *r*, et la demi-virole *o* avec la virole *q* par une languette *x* qui les unit. Enfin les faces latérales d'un bloc de bois portent deux plaques de laiton *m*, *n* sur lesquelles sont maintenues, par des vis de pression, deux lames élastiques de laiton *b* et *c*, qui s'appuient successivement sur les demi-viroles *o* et *o'* pendant la rotation. Les pièces *o*, *o'* sont donc en quelque sorte les pôles des courants induits alternatifs et ces pôles sont eux-mêmes alternativement positifs et négatifs.

Or, si l'on considère l'instant où la demi-virole *o'* est positive, le courant descend par la lame *b*, suit la plaque *m*, arrive en *n* par le fil conjonctif *p*, monte en *c*, et se ferme au contact de la pièce *o*; puis, lorsque, par l'effet de la rotation, *o* prend la place de *o'*, le courant ne peut changer de sens dans le circuit extérieur, car, en même temps qu'il est renversé dans les bobines, *o* est devenu positif et *o'* négatif.

Le support M est muni de deux garnitures métalliques latérales, qui communiquent avec les pôles *b* et *c*. C'est en deux points de ces lames que sont fixées les extrémités du circuit extérieur.

5° *Interrupteur.* — Cet organe accessoire se compose d'une troisième lame élastique *a* (fig. 940), et de deux appendices *i* qui partent des viroles *o* et *o'* et sont isolés sur le cylindre d'ivoire. Toutes les fois que la lame *a* touche un de ces appendices, elle est mise en communication avec la lame opposée *b*, et le courant se trouve fermé en court circuit, car il passe alors de *b* en *a*, puis gagne la lame *c* par la plaque *n*. Au contraire, tant que la lame *a* ne touche pas un des appendices, le courant est interrompu, et un extra-courant prend naissance dans le conducteur qui réunit les deux plaques *m* et *n*.

1040. **Machine de Siemens.** — La modification la plus importante qu'on ait apportée, depuis Clarke, aux machines d'induction fut la bobine construite en

Fig. 944.

1854 par Siemens et Halske. Elle différait des bobines ordinaires à la fois par la forme du noyau et par le mode d'enroulement du fil.

La bobine est oblongue, sur une longueur de 0,50 m à 1,50 m, suivant la puissance qu'on veut donner à la machine. Le noyau est en fer doux; il a été d'abord façonné en cylindre, puis entaillé sur toute sa longueur d'une profonde et large rainure (fig. 944). Le fil de cuivre, isolé à la soie, s'y enroule un grand nombre de fois comme sur un multiplicateur, mais parallèlement à l'axe, et non *perpendiculairement* comme dans la bobine de Clarke.

Cette bobine, munie d'un commutateur, tourne entre les branches d'un aimant en fer à cheval (fig. 945) dont les armatures sont alésées de manière à l'entourer très étroitement : cette disposition réduit le champ magnétique à son minimum d'étendue et à son maximum d'intensité. La machine gardait l'aspect général de celle de Clarke.

Fig. 945.

Remarque. — Un nombre considérable de modèles de machines dynamo-électriques ont été construites depuis une vingtaine d'années. Mais, comme elles sont toutes plus ou moins dérivées de deux types, 1° l'ancienne machine de Clarke, 2° la machine plus récente de Gramme, il n'y a d'intérêt réel qu'à connaître ces deux types.

1041. Machine de Gramme à courants continus. — Cette machine est caractérisée par son induit spécial appelé *anneau de Gramme* et son collecteur de courants, dit *collecteur de Gramme*. Cet induit tourne dans un champ magnétique créé par un aimant ou par un électro-aimant.

Fig. 946.

1° *Anneau de Gramme.* — L'induit est formé d'un certain nombre de bobines, réunies en cercle. Elles n'ont pas chacune un noyau distinct, mais elles s'enroulent toutes sur un noyau commun qui est constitué par un fil unique de fer doux, de $\frac{9}{10}$ de millimètre de diamètre, enroulé sur lui-même un grand nombre de fois, de manière à former un faisceau circulaire (fig. 946). Les spires sont isolées les unes des autres de façon à éviter la formation des *courants* de Foucault. Les bobines B, C, D...., qui sont représ-

sentées séparées (fig. 946), sont en réalité réunies l'une à l'autre, comme on le voit dans la partie supérieure de la même figure, par des équerres de cuivre *mn*. A chacune des branches verticales de ces pièces viennent se souder deux fils de cuivre, l'un qui finit et l'autre qui commence deux bobines consécutives, de sorte que l'ensemble des bobines ne forme qu'un seul et même circuit induit.

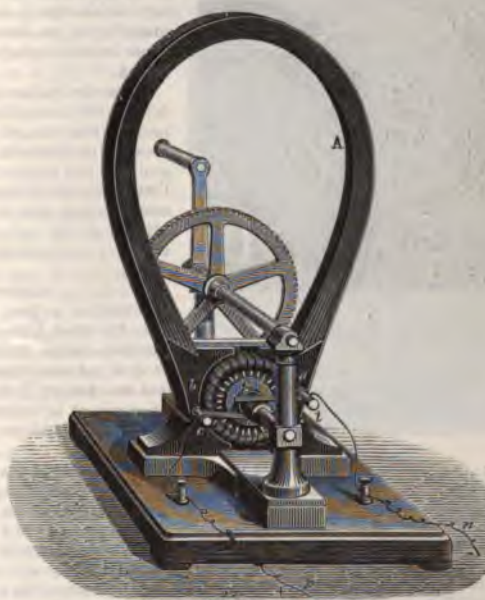


Fig. 947.

2° *Collecteur du courant.* — Les équerres sont isolées les unes des autres et fixées sur un bloc de buis O (fig. 946) qui est monté sur l'axe de rotation; les branches horizontales *mr* des équerres forment une gaine autour de cet axe, et deux pinceaux (ou *balais*) de fils (ou de toile métallique) de cuivre rouge, fixés aux bornes *c* et *i* (fig. 947), frottent constamment sur les parties supérieures et inférieures de cette gaine, de manière à recueillir les courants qui prennent naissance dans les bobines. C'est l'ensemble des *balais* et du cylindre à génératrices métalliques qui *constitue le collecteur de Gramme.*

3° *Théorie. — Génération du courant.* — Si l'on produit le spectre magnétique de l'inducteur de la machine (fig. 948), on y remarque une disposition spéciale des lignes de force. La très grande majorité des lignes de force émanées de l'armature N, après avoir traversé l'intervalle des armatures (ou *entrefer*), pénètrent dans l'anneau qu'elles suivent circulairement par moitié pour aller rejoindre à leur sortie l'armature S. Le champ magnétique est donc dirigé d'une manière générale de N vers S.

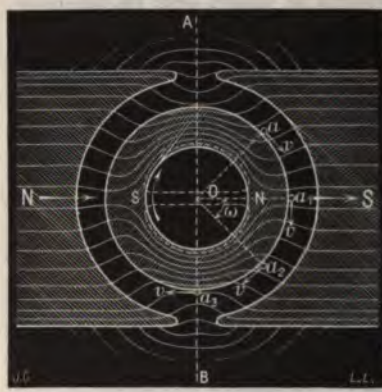


Fig. 948.

Supposons qu'une spire se déplace avec une vitesse v le long de l'anneau, et dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre; soit H l'intensité du champ coupé normalement par la partie utile l de la spire (partie enroulée en regard des armatures).

La force électromotrice d'induction a pour valeur Hlv. Elle tend à produire un courant dirigé d'arrière en avant dans la section a de la spire. En a_1 la valeur de H est maximum. En a_2 elle est nulle, puisque l'élément de spire est tangent au champ; il en est par suite de même de e. Au delà de a_2, le champ H conservant la même direction, le déplacement changeant de sens, il en est de même de la force électromotrice.

Fig. 949.

En résumé, si l'on considère l'ensemble des bobines (sériées ainsi qu'il a été expliqué), et l'induit en rotation, on voit que les forces électromotrices induites dans les bobines placées à droite de la verticale AB s'ajoutent d'une part, et celles engendrées dans la partie gauche s'ajoutent de même entre elles et s'opposent aux premières dans l'induit. La ligne AB se nomme *ligne neutre*.

Mais si l'on place les deux balais sur les touches rencontrées par la ligne neutre AB, lesquelles correspondent respectivement aux points où la force électromotrice se change de signe, les deux balais prendront en circuit ouvert une différence de potentiel d'autant plus grande que les facteurs l, v et H seront plus grands.

Collection du courant. — Tout se passe comme si on couplait *en opposition*, c'est-à-dire par leurs pôles de même nom, deux séries d'un même nombre d'éléments voltaïques. Pour produire un courant à l'aide de ce groupement, il faut évidemment joindre les points C et Z par un circuit extérieur (fig. 949). Dès lors le courant circule d'une manière continue de C vers Z, et les deux piles en série ne sont plus en opposition, mais associées en quantité.

C'est d'une manière analogue qu'on recueille les courants de l'anneau de Gramme. En plaçant les balais F et F' sur le diamètre perpendiculaire à la

ligne des pôles, c'est-à-dire aux points où les deux forces électromotrices opposées vont concourir, ces balais seront dans les mêmes conditions que s'ils communiquaient avec les pôles C et Z de la pile précédente : un circuit extérieur allant d'un balai à l'autre sera parcouru par un courant, *continu* si le contact est toujours assuré, et *constant* si la vitesse de rotation est uniforme.

Remarques. — 1° *Variation du courant.* — Ce courant subit nécessairement de petites variations d'intensité. Chaque fois, en effet, qu'un balai est en contact avec deux touches consécutives du collecteur, une bobine se trouve éliminée de la série puisqu'elle se trouve fermée sur elle-même. On remarquera d'ailleurs que les bobines supprimées se trouvent dans les régions où le champ est le plus faible. Il est clair d'autre part que cet effet sera d'autant plus atténué que l'induit portera un plus grand nombre de bobines.

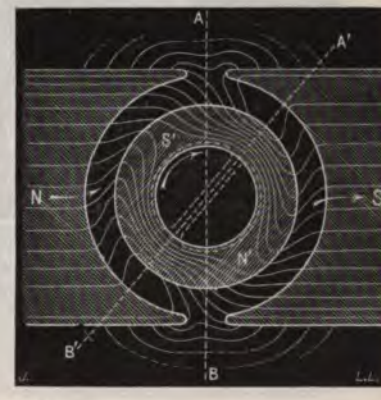


Fig. 950.

2° *Calage des balais.* — Dans les machines, les balais collecteurs ne sont pas exactement placés sur la *ligne* AB, ainsi que l'exigerait la théorie précédente; cela n'a lieu que lorsque la machine fonctionne en *circuit ouvert*, c'est-à-dire lorsque ses bornes ne sont pas réunies par un circuit extérieur; mais en *circuit fermé* les balais sont déplacés, suivant A'B', d'un certain angle dans le sens du mouvement générateur.

C'est que, en réalité, le champ total résulte du champ inducteur et du champ que produit le noyau de l'induit, lorsqu'il se trouve aimanté par les courants opposés qui circulent dans les deux moitiés des bobines qu'il porte. La composition des deux champs a pour effet de tordre les lignes de force primitives dans le sens du mouvement (fig. 950) et de reporter les points où la force électromotrice induite est nulle d'un certain angle dans le sens du mouvement. Il en résulte une déviation AA' de la ligne neutre dans le sens de la rotation de l'anneau. Dans la pratique, on déplace les systèmes des deux balais de façon que les étincelles ne jaillissent plus entre eux et le collecteur. La *ligne neutre* A'B' fait avec sa position théorique AB un angle plus ou moins grand, *qui peut atteindre* 10° pour de grandes vitesses. Or la position des balais, — leur *calage*, comme on dit, — dépend de l'orientation de la ligne neutre; ils doivent tourner sur l'horizontale (ou sur la verticale, suivant l'orientation des pôles inducteurs) du même angle que la ligne neutre. Cet angle dépend d'ailleurs de l'intensité i du courant, ce qui exige un réglage lorsqu'on change le régime de la machine. On l'effectue en agissant sur la poignée P (fig. 952) qui commande les balais.

1042. Machine de Gramme à courants continus. — 1° *Type d'atelier.* — Parmi les machines *dynamo-électriques* à courant continu, le modèle dit *type d'atelier* est le plus ancien dans l'industrie. La bobine induite et le collecteur de courants sont les mêmes, et les courants y sont engendrés et recueillis de la même manière que précédemment. L'inducteur est constitué par deux

électro-aimants à deux branches horizontales (fig. 951), disposées vis-à-vis l'une de l'autre, dans un plan vertical.

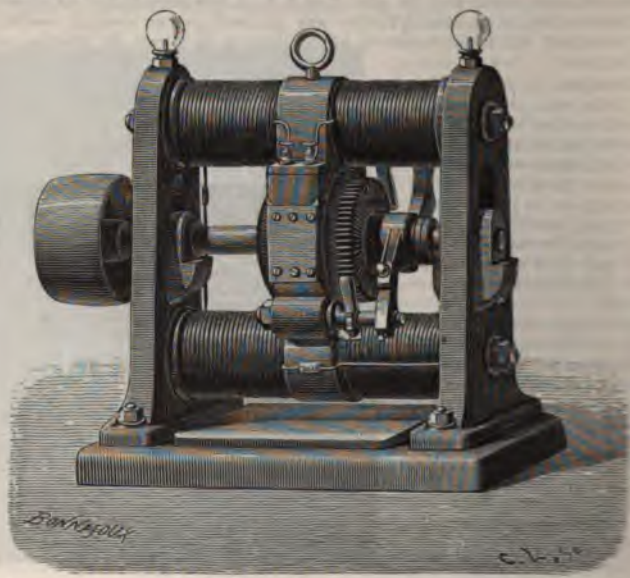


Fig. 951.

2° *Type supérieur.* — Un nouveau modèle, dit *type supérieur*[1] (fig. 952), tend à remplacer aujourd'hui le type d'atelier. L'inducteur fixe est un électro-aimant en fer à cheval E, dont les noyaux et les surfaces polaires A et B sont en fonte douce, et coulés d'un même jet avec le bâti. L'anneau tourne entre les pièces polaires, et il est porté par un axe, muni de la poulie R, commandée par une courroie de transmission. Cet axe tourne dans des paliers à graissage automatique. Le calage des balais P et P' peut se faire aisément à l'aide d'un double porte-balais que l'on peut mouvoir d'une seule pièce.

3° *Usages.* — Ces machines à courant continu sont employées aux usages les plus divers : galvanoplastie, éclairage électrique, transmission de l'énergie à distance ; seulement les dimensions des bobines, de l'inducteur et de l'induit sont différentes suivant le travail à exécuter. Quand il faut produire de l'électricité en grande quantité, comme dans les applications électrochimiques, la machine doit avoir une résistance intérieure médiocre, et alors les électro-aimants sont garnis, au lieu de fil rond, d'une seule bande de cuivre mince, tenant toute la largeur des barres et formant une spire unique autour de

1. Cette appellation ne se justifie guère que par certains perfectionnements d'ordre mécanique et matériel, qui abaissent le prix de revient de l'appareil et en rendent le maniement plus commode.

chacune d'elles; l'anneau est garni lui-même avec du fil méplat très épais. Quand il faut produire de l'électricité *à haut potentiel*, comme dans l'éclairage électrique, on fait les bobines avec du fil ordinaire, d'un diamètre plus petit.

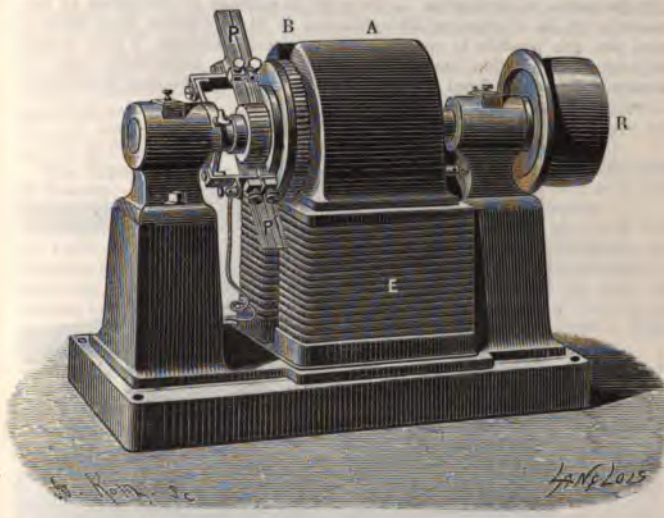


Fig. 952.

1043. Excitation des machines à courant continu. — Le champ inducteur des machines peut être créé par des aimants ou bien par des électro-aimants; ceux-ci sont animés par le courant d'une machine indépendante appelée *excitatrice*. Ordinairement le *courant d'excitation* des électros est emprunté à celui de la la machine elle-même, qui est dite alors *auto-excitatrice*. Ce dernier mode d'excitation, que le magnétisme remanent des électros rend possible, comporte plusieurs solutions.

1° *Excitation en série.* — C'est le cas où *le fil enroulé sur les électros est la continuation du fil qui constitue l'induit* : la totalité du courant traverse à la fois le fil de l'induit, celui de l'inducteur et le circuit extérieur. Il y a évidemment intérêt à prendre alors comme circuit inducteur un conducteur peu résistant. Ce mode d'excitation, qui a l'avantage d'être le plus simple, présente plusieurs inconvénients.

Si la résistance extérieure est trop grande, la machine *ne s'amorce pas*.

Si, la vitesse étant constante, la résistance extérieure diminuait de plus en plus, l'intensité du courant augmenterait d'autant et le fil de l'induit pourrait être brûlé par l'effet Joule. On prévient cet accident en intercalant dans le circuit des *fils fusibles* qui fondent et interrompent le circuit avant que le courant soit dangereux pour la machine.

Pour la même raison, il faut éviter les *courts-circuits*, qui provoqueraient un brusque accroissement d'intensité et un vif dégagement de chaleur.

Lorsqu'on veut arrêter une machine excitée en série, il importe d'introduire

progressivement des résistances dans le circuit ou, si l'on préfère, de dériver sur le fil inducteur des résistances décroissantes de manière à affaiblir graduellement le courant d'excitation : l'arrêt brusque développerait des effets d'induction dangereux pour l'induit.

2° *Excitation en dérivation.* — On excite la machine *en dérivation* en disposant le fil des électros *en dérivation* sur le fil de l'induit. Pour affaiblir aussi peu que possible le courant, dans le circuit extérieur, il faut donner au circuit d'excitation une grande résistance. On augmentera donc le nombre des spires de façon à obtenir un nombre d'ampères-tours NI suffisant.

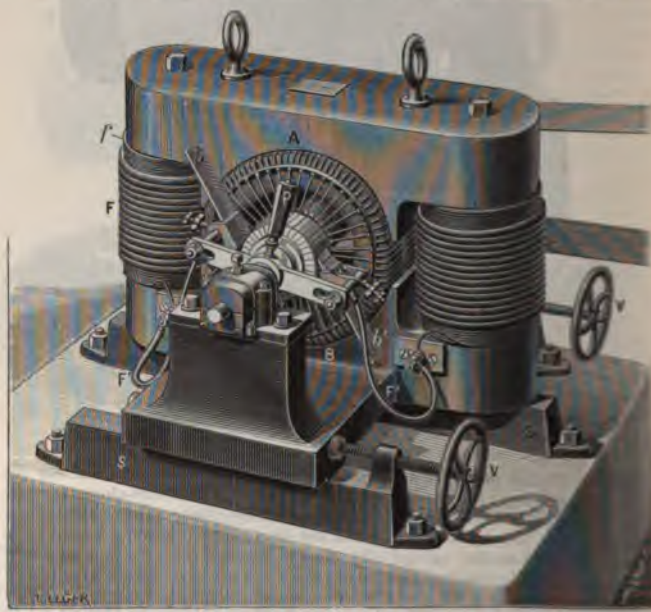


Fig. 953.

Dans le cas de l'excitation en série, la machine ne peut s'amorcer qu'autant qu'on relie ses bornes par un conducteur, car, sans cela, le fil de l'induit et celui de l'inducteur formeraient un circuit ouvert; il n'en est plus de même ici, car l'ensemble des deux fils en dérivation forme toujours un circuit fermé.

De plus, on n'a pas à craindre, comme dans le cas précédent, que l'effet d'une force contre-électromotrice contenue dans le circuit extérieur ne vienne brusquement renverser l'aimantation des électros, par suite d'un affaiblissement du courant de la machine.

Toutefois, si la résistance extérieure décroît au delà d'une certaine limite, la machine peut se désamorcer, car le courant qui circule dans l'inducteur n'est plus assez intense pour maintenir l'état magnétique de la machine.

la résistance du circuit extérieur augmente, le courant augmente; il en est de même de la force électromotrice induite. C'est l'inverse de ce qui a lieu dans le cas de l'excitation en série.

Ajoutons que le fil des induits des machines excitées en dérivation a ordinairement une résistance extrêmement faible, si bien que la force électromotrice induite ne diffère pas sensiblement de la différence de potentiels aux bornes de la machine.

3° *Dynamos compound.* — Dans les *dynamos compound*, on emploie les deux modes d'enroulement précédents, de manière à obtenir une différence de potentiels aux balais qui soit constante et indépendante du circuit extérieur. On peut même arriver à maintenir la différence de potentiels constante aux bornes de l'appareil d'utilisation.

1044. **Type nouveau de machine Gramme à courant continu : Modèle Limb et Gianotti.** — On voit (fig. 953) une dynamo à double enroulement F, *f*, construite par MM. Limb et Gianotti, qui offre plusieurs perfectionnements.

La ligne neutre théorique est horizontale, les pièces polaires sont en A et B, les balais en *b* et *b'*. Les vis à volant V servent à déplacer la machine sur les supports S de manière à tendre convenablement la courroie de commande. Le noyau de l'induit est formé de couronnes empilées et isolées les unes des autres; les bobines sont logées dans des entailles disposées régulièrement sur le pourtour du noyau. L'entrefer peut être alors très réduit. Enfin le mode d'attache de l'induit sur l'arbre assure une bonne ventilation.

1045. **Machine de Gramme à courants alternatifs,** ou **Machine à lumière.** —

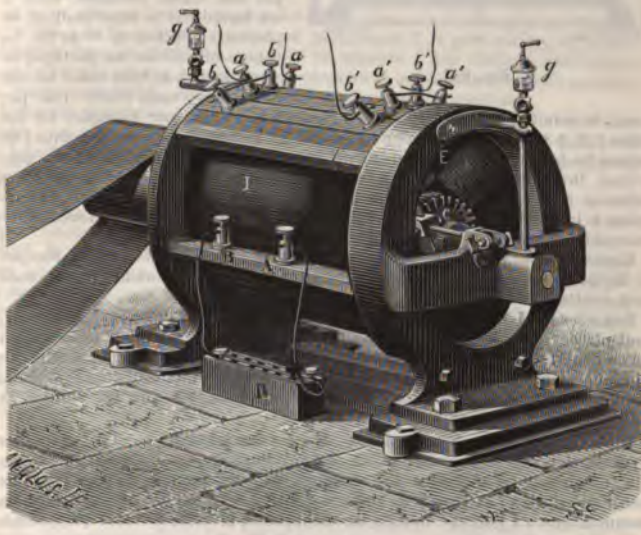


Fig. 954.

C'est une machine dynamo-électrique à courants alternatifs, impropement *dénommée auto-excitatrice.* A gauche (fig. 954) est la machine à lumière pro-

prement dite; à droite est l'excitatrice. Celle-ci est une machine ordinaire de Gramme à courants continus. N et S (fig. 955) sont les deux pôles de l'inducteur fixe, II' est l'anneau induit mobile, dont le collecteur se projette suivant un petit cercle concentrique et intérieur à l'anneau.

La machine à lumière proprement dite est formée d'un induit fixe et d'un inducteur mobile.

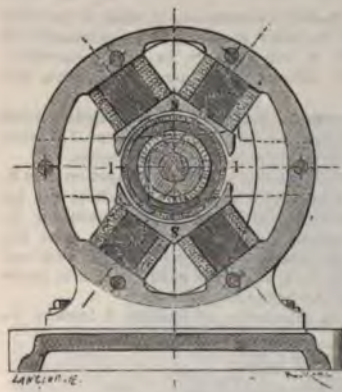


Fig. 955.

L'inducteur, dans le modèle ordinaire, est formé de six barres d'électro-aimants, implantées normalement dans un massif hexagonal qui est concentrique à l'axe de rotation. Le circuit inducteur s'enroule autour de ces barres de manière à former, lorsqu'il est parcouru par le courant continu de l'excitatrice, des pôles alternativement contraires dont les surfaces polaires s'épanouissent perpendiculairement à la direction des barres.

L'induit est une bobine de fil de cuivre, enroulée sur un cylindre en fer doux. Ce noyau n'est pas une masse continue, mais il est formé par la superposition de plusieurs couches de fil de fer. La bobine elle-même est partagée en douze segments, bien isolés les uns des autres, mais reliés trois par trois, de manière à constituer *quatre circuits distincts* : par exemple, les bobines 1, 3, 5 forment un premier circuit, et les bobines 2, 4, 6 un deuxième; de même les bobines 7, 9, 11 forment un troisième circuit, et 8, 10, 12 un quatrième. Ordinairement on groupe les deux premiers circuits en *série*, par leurs pôles de nom contraire, ainsi que les deux derniers, de manière que la machine à lumière soit divisée en deux machines qu'on peut faire fonctionner ensemble ou séparément.

Génération des courants. — Les courants sont induits dans la bobine fixe par le déplacement de l'électro-aimant inducteur. Celui-ci est animé par le courant continu de l'excitatrice.

Remarque. — Les deux bornes A et B qu'on voit (fig. 954) sur l'avant du bâti, sont placées dans le circuit de l'excitatrice. Elles y forment une interruption qu'on peut fermer avec une résistance variable, de manière à augmenter ou diminuer l'intensité du courant continu, et par suite l'intensité du magnétisme inducteur. On règle ainsi, dans une certaine limite, suivant les besoins, la puissance de la machine à lumière.

1046. **Réversibilité des machines dynamo-électriques.** — Les machines dynamo-électriques prouvent qu'en faisant tourner des bobines devant un électro-aimant on engendre des courants. On peut prévoir, d'après la loi de Lenz, que si l'on fait passer un courant continu dans une de ces machines, on communiquera à l'organe mobile un mouvement inverse de celui qui produirait ce courant continu.

L'expérience confirme cette prévision. On la réalise aisément à l'aide de l'une quelconque des machines de Gramme à courants continus. Si l'on met les bornes *c* et *i* (fig. 947) en communication avec les pôles d'une pile de quelques éléments Bunsen, le noyau de fer doux s'aimantant aussitôt par l'action du cou-

rant qui parcourt les bobines, tout le système prend un mouvement de rotation rapide.

Ou bien encore, on dispose dans un même circuit deux machines pareilles à celle de la figure 1951, puis l'on met l'une d'elles en mouvement : le courant qu'elle engendre passant dans l'anneau de l'autre machine, celui-ci se met à tourner. Si alors on fait marcher la première en sens inverse, la seconde s'arrête, puis se met à tourner de nouveau et *dans le même sens* : le même courant passant successivement dans la bobine fixe et dans la bobine mobile, qui réagissent l'une sur l'autre, on conçoit que le produit des deux actions de même signe reste toujours le même quel que soit le sens du courant.

On exprime ce fait en disant que les machines Gramme sont *réversibles*. Il en est de même, en général, pour toutes les machines dynamo-électriques,

1047. Moteurs électriques. — Transport de l'énergie mécanique. — On appelle *moteurs électriques* les machines qui transforment l'*énergie électrique* en *énergie mécanique*, de même que les *moteurs thermiques* transforment la chaleur en énergie mécanique.

Les premiers moteurs électriques qu'on ait construits furent des moteurs dits *électromagnétiques*, dans lesquels on utilisait la force attractive des électro-aimants comme force motrice.

D'après la propriété de la réversibilité, une machine dynamo-électrique quelconque peut servir de moteur, le courant excitateur étant emprunté à une machine identique : celle qui engendre le courant est appelée la *génératrice*, et celle qui l'utilise est appelée *réceptrice*. On emploie généralement des dynamos à courants continus.

La principale application des moteurs est le transport de l'énergie mécanique. Cette énergie, fournie par un moteur quelconque à la génératrice, s'y transforme en énergie électrique, laquelle est envoyée à une distance quelconque sous forme de courant électrique à la *réceptrice*, qui la transforme de nouveau en énergie mécanique, sous la forme de mouvement de rotation.

L'énergie transmise à la réceptrice peut être dépensée de différentes manières : en lumière (éclairage électrique), en chaleur (chauffage électrique), ou en travail mécanique (locomotion électrique et mise en marche des machines-outils).

On comprend tout l'intérêt du problème du transport de l'énergie quand on songe au nombre et à l'importance des sources naturelles d'énergie mécanique : chutes d'eau, vents, marées, etc., encore inutilisées.

1048. Étude du rendement des moteurs électriques. — 1° *Formules.* — Supposons que l'on fasse tourner la *génératrice* au moyen d'un moteur à vapeur ou autre, et soit r_1 sa résistance intérieure et E_1 la force électromotrice *constante* développée. Le courant circule dans un *fil de ligne* de résistance totale ρ. Il passe dans une *réceptrice* de même espèce que la première machine, de résistance intérieure r_2 : l'induit de cette machine se met alors à tourner et développe, dans les conditions où elle fonctionne, une force électromotrice E_2 de sens opposé à E_1, si bien que l'intensité du courant qui passe dans le circuit total de résistance $r_1 + r_2 + \rho$ a pour intensité

$$[1] \qquad I = \frac{E_1 - E_2}{r_1 + r_2 + \rho}.$$

La *puissance électrique* de la génératrice est alors $P_1 = E_1 I$ [2]
et celle de la réceptrice $P_2 = E_2 I$. [3]

Le *rendement électrique* de la transmission a donc pour expression

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{E_2}{E_1}.$$

Remarque — Ce rendement est toujours inférieur à l'unité. Si en effet on pouvait avoir $E_2 = E_1$, il s'ensuivrait, d'après les équations [1], [2], [3], que I, P_1 et P_2 seraient nuls, et il n'y aurait plus transmission de puissance. Si donc on cherche à faire tendre vers l'unité le rendement électrique, on diminue du même coup la puissance transmise.

2° *Maximum de la puissance transmise.* — Cherchons dans quelles conditions la puissance transmise est maximum.

On a

$$[4] \qquad P_2 = E_2 I = \frac{E_2 (E_1 - E_2)}{r_1 + r_2 + \rho}.$$

P_2 sera maximum en même temps que le produit

$$E_2 (E_1 - E_2),$$

si on suppose que l'on ne modifie pas la résistance du circuit. Or la somme des deux facteurs E_2 et $E_1 - E_2$ a pour valeur E_1, c'est-à-dire que cette somme est constante : le maximum a donc lieu lorsque les deux facteurs sont égaux.

On a alors

$$E_2 = E_1 - E_2, \qquad \text{d'où} \qquad E_2 = \frac{E_1}{2}.$$

Par conséquent, si une génératrice fonctionne de façon à développer une force électromotrice E_1, on transmettra par seconde à la réceptrice la quantité d'énergie maximum en réglant l'installation de façon que la force contre-électromotrice développée E_2 soit égale à $\frac{E_1}{2}$. L'intensité du courant est alors égale à la moitié de celle qu'on obtiendrait en calant la réceptrice.

Dans de telles conditions le rendement électrique est égal à $\frac{1}{2}$.

Il y a donc à considérer un rendement qui correspond à la plus grande économie d'énergie et un rendement qui correspond en quelque sorte à la plus grande économie de temps.

3° *Rendement industriel.* — Au point de vue pratique, le *rendement industriel* de la transmission est le rapport de la puissance mécanique dépensée sur l'arbre de la génératrice à la puissance mécanique recueillie sur l'arbre de la réceptrice.

Comme il est impossible d'éviter l'effet Joule, qui est proportionnel au carré de l'intensité, il y a une énergie perdue en chaleur rayonnée par le circuit. On l'atténue beaucoup en transmettant l'énergie électrique sous un haut potentiel et une faible intensité.

1049. **Transport de l'énergie par les machines à courants alternatifs.** — Dans le cas où on emploie des machines à courants alternatifs, on peut faire usage d'un câble à faible section. Le courant de la génératrice a alors une intensité efficace I très faible. La puissance transmise $P_2 = E_2 I$ restant constante, la force électromotrice efficace de la génératrice sera très grande.

Pour utiliser ce courant, on pourra, s'il y a lieu, au moyen d'un transformateur approprié, modifier les qualités de l'énergie transmise. On augmentera l'intensité en diminuant la force électromotrice : le produit $E' I'$, c'est-à-dire la puissance utilisée, restera très sensiblement constante, car le rendement électrique d'un transformateur bien établi peut atteindre 96 pour 100.

CHAPITRE XIV

APPLICATIONS DE L'ÉLECTROLYSE

GALVANOPLASTIE ET ÉLECTROCHIMIE. — ACCUMULATEURS.

1050. **Définition.** — La décomposition des sels par la pile a reçu une importante application dans la *galvanoplastie*. On nomme ainsi l'art de modeler les métaux en les précipitant de leurs dissolutions salines par l'action lente d'un courant électrique.

Elle comprend deux ordres d'applications : 1° le dépôt de couches métalliques, plus ou moins épaisses, qui se moulent exactement sur les objets à reproduire, mais *sans y adhérer*; 2° le dépôt de couches métalliques minces qui *adhèrent* aux objets et en protègent la surface sans en altérer la forme. Les procédés qui servent dans le premier cas constituent la *galvanoplastie proprement dite*; les procédés employés pour les autres applications constituent l'*électrochimie* ou *galvanisation*, qui comprend : la *dorure*, l'*argenture*, le *cuivrage* et le *nickelage galvaniques*.

1051. **Galvanoplastie proprement dite.** — En 1837, Jacobi, en Russie, et Spencer, en Angleterre, trouvèrent le moyen d'obtenir des moules de médailles, puis des reproductions en cuivre de ces médailles par l'intervention du courant de la pile. Jacobi imagina quelques années après d'employer une *anode soluble*, c'est-à-dire une lame de cuivre, servant d'électrode positive, dans le bain de cuivrage (fig. 956); comme elle est dissoute par l'oxygène qui s'y dégage, et qu'elle donne lieu à la production de sulfate de cuivre, elle a le double avantage d'éviter la polarisation et de maintenir constante la concentration du bain métallique. Enfin, Bocquillon en France, et Murray en Angleterre, se servirent les premiers de moules non métalliques.

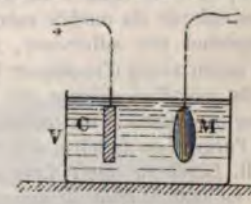


Fig 956.

Les opérations de galvanoplastie peuvent se résumer en deux principales[1] :

1. Tous les renseignements techniques nous ont été obligeamment fournis par M. M. Bazinet, *ancien élève du Laboratoire des recherches (Physique), directeur d'une usine d'électrochimie.*

I. Confection d'un moule soit en métal, soit en matière plastique métallisée ou rendue conductrice de l'électricité.

II. Dépôt sur ce moule d'une couche épaisse et non adhérente de cuivre.

I. *Préparation du moule.* — 1° *Moulage métallique.* — On peut se servir d'alliage Darcet, qu'on coule sur l'objet dont on veut prendre l'empreinte.

On peut encore, si l'objet est métallique, y déposer une mince couche de cuivre. On le place comme cathode dans le bain de galvanoplastie, après l'avoir légèrement frotté avec un tampon d'ouate imbibé d'essence de térébenthine pour empêcher l'adhérence des deux métaux.

Ces procédés ne sont applicables qu'à des objets « *de dépouille facile* », c'est-à-dire qui ne présentent pas de très grands creux, et qui ne sont attaquables ni par la chaleur, pour le premier, ni par l'acidité du bain, pour le deuxième procédé.

2° *Moulage non métallique.* — On prend facilement les empreintes des médailles, et autres objets *de dépouille facile*, en coulant à leur surface de la *cire fondue*, ou de la *stéarine*, ou de la *gélatine*, ou du *plâtre*; mais le procédé le plus employé est le moulage à la *gutta-percha*.

On ramollit dans l'eau bouillante la gutta, et on la comprime sur l'objet, soit à la main qu'on a soin de mouiller d'eau froide, soit au moyen d'une presse hydraulique jusqu'au refroidissement complet de la masse. La gutta conserve assez d'élasticité pour être enlevée du modèle même s'il y a des creux prononcés. Pour empêcher son adhérence, il a suffi d'enduire le modèle d'eau de savon avant d'appliquer la gutta[1].

On *métallise* ensuite ces moules en les enduisant de plombagine ou mieux d'un mélange de plombagine avec du cuivre ou de l'argent en poudre, obtenus par précipitation.

II. *Dépôt du cuivre dans les bains et appareils à galvanoplastie.* — Le bain *simple* ou *appareil simple* (fig. 957) se compose d'un élément de Becquerel dans lequel l'objet à recouvrir remplace le pôle de cuivre. Ce bain sert très peu depuis l'introduction des machines dynamo-électriques dans les ateliers de galvanoplastie.

On emploie généralement l'*appareil composé* (fig. 958), qui est constitué par une cuve de dimensions variables remplie du bain de cuivre, et munie de deux baguettes en laiton : l'une d'elles B, reliée au pôle négatif de l'électromoteur, porte les moules qu'on

1. Dans le cas d'une ronde bosse on prend le moule en plusieurs parties qu'on rassemble ensuite au moyen de repères.

vient de préparer, et l'autre D, reliée au pôle positif, porte l'anode soluble qui est en cuivre rouge. Le *bain composé* est une solution presque saturée de sulfate de cuivre, acidulée par de l'acide sulfurique (8 0/0, en poids environ).

L'intensité du courant doit être faible au début : 100 ampères au plus par mètre carré. Quand toutes les parties du moule sont bien recouvertes, on peut atteindre de 300 à 500 ampères, et activer ainsi l'opération. Au bout de vingt-quatre heures, on aura une couche d'environ 1 millimètre d'épaisseur.

Lorsque le dépôt a atteint l'épaisseur voulue, on lave l'objet et on le détache de son moule en ramollissant la gutta avec de l'eau chaude.

Fig. 957.

1052. **Électrotypie.** — En recouvrant de cuivre l'empreinte d'une gravure sur bois, sur cuivre ou obtenue par la photogra-

Fig. 958.

phie, on obtient un cliché galvanique de cette gravure. Ce cliché est extrêmement mince (environ 0,05 mm d'épaisseur), et il ne *résisterait pas à la pression* des presses typographiques si on n

le renforçait en coulant au revers une couche de l'alliage des caractères d'imprimerie, qui permet d'obtenir de nombreuses reproductions de la gravure.

Pour lui donner plus de dureté, on le recouvre d'un dépôt pelliculaire de fer dans un bain qui a été formé en dissolvant sous l'influence du courant électrique une lame de fer dans une solution de carbonate d'ammoniaque. On se sert aussi du platine et du nickel.

Ainsi préparés, les clichés galvaniques peuvent supporter des tirages énormes sans déformation. D'ailleurs le cliché primitif (bois ou cuivre), restant intact, peut donner des clichés galvaniques autant qu'on en veut.

1053. **Électrochimie. — Opérations préliminaires.** — La dorure, l'argenture, etc., *galvaniques*, qui constituent l'*électrochimie* proprement dite, comportent diverses opérations préliminaires, que l'on conduit différemment suivant que les objets sont en cuivre ou en laiton, ou bien en tout autre métal. Elles ont pour but de débarrasser les objets à traiter des matières grasses et des oxydes dont ils sont toujours enduits et de rendre leur surface plus apte à recevoir la couche du métal précieux.

Cette préparation est extrêmement importante, car de la façon dont elle a été conduite dépend souvent le succès.

1° *Décapage des objets en cuivre ou en laiton.* — On se débarrasse des matières organiques, soit par le *recuit*, qui consiste à chauffer les objets jusqu'à la destruction des matières organiques, soit plus simplement par une immersion prolongée dans une solution bouillante et concentrée de *potasse d'Amérique*.

On place ensuite les objets pendant quelques instants dans un bain de 20 parties d'acide sulfurique pour 100 parties d'eau (*dérochage*), qui dissout le bioxyde de cuivre qui peut se trouver à la surface des pièces.

Après le dérochage, les pièces présentent une couleur rouge uniforme, due à une couche de protoxyde de cuivre. On la fait disparaître en trempant quelques instants les objets dans de l'acide azotique ordinaire (*passage à l'eau forte*), puis dans un mélange d'acide azotique, d'acide sulfurique, de sel marin et de suie calcinée (*bain de blanchiment*).

Si le décapage a été bien conduit, la pièce sort du bain de blanchiment avec une surface bien brillante et sans taches[2].

Remarque. — Si l'on veut obtenir une dorure ou une argenture *mate*, il faut

1. *Cas des objets en ronde bosse : procédé Lenoir.* — Pour reproduire les objets en *ronde bosse*, on emploie le procédé suivant dû à M. Lenoir : On prépare des moules des différentes parties de l'objet et on les métallise, puis on les assemble, après avoir introduit dans l'intérieur un faisceau de fils de platine auquel on donne grosso *modo* la forme de l'objet à reproduire ; on verse enfin la solution de sulfate de cuivre dans le moule et l'on fait passer le courant.

2. Dans toutes ces opérations, les objets sont tenus par des crochets de cuivre, afin d'éviter les taches que ferait le contact des doigts.

mater les pièces après les avoir passées à l'eau forte. — On obtient ce résultat en les plongeant dans un mélange d'acide sulfurique, d'acide azotique et de sulfate de zinc, chauffé à 90° environ. On les passe ensuite au bain de blanchiment.

2° *Cas des autres métaux.* — Les métaux autres que le cuivre et ses alliages ne pourraient supporter ces diverses opérations sans être profondément altérés.

On décape l'argent en le dégraissant dans la potasse, en le laissant quelques instants dans le bain de *dérochage*, puis en le frottant avec une brosse de crin et une bouillie de pierre ponce finement pulvérisée.

Le *fer* et l'*acier* sont passés à la potasse, puis immergés quelques instants dans de l'acide chlorhydrique.

Le *zinc* est dégraissé *rapidement* dans la potasse (qui le dissoudrait par un séjour prolongé), puis passé au bain de blanchiment.

Le *plomb*, l'*étain* et leurs alliages (métal blanc) sont passés rapidement à la potasse, puis frottés avec la ponce.

Remarque. — Toutes ces opérations de décapage nécessitent une surveillance assidue, car un séjour trop prolongé dans les acides attaquerait inégalement la surface des pièces et produirait des *piqûres* [1].

3° *Amalgamation des objets.* — Les objets étant bien décapés sont rincés à grande eau dans une série de trois ou quatre baquets disposés en cascade, puis passés rapidement dans une solution très faible d'azotate de mercure. Il se dépose ainsi à leur surface une couche de mercure inappréciable à l'œil, mais qui augmente beaucoup l'adhérence de l'or ou de l'argent qu'on déposera.

4° *Cuivrage pelliculaire.* — Les objets en étain, en zinc et en fer se dorent ou s'argentent mal directement. On est obligé de les recouvrir préalablement d'une couche très mince de cuivre. On les suspend comme cathode dans un bain de cyanure double de cuivre et de potasse chauffé à 80° environ ; l'anode soluble est une lame de cuivre.

1054. **Dorure galvanique.** — On a beaucoup varié la composition des bains d'or. Les uns s'emploient à froid, les autres à chaud. Il est préférable d'opérer à 80° environ.

Voici l'une des formules les plus employées :

Cyanure de potassium pur.	50 grammes.
Or réduit en chlorure neutre	10 —
Eau distillée ou eau de source.	10 litres.

Ce bain est placé dans une cuve de fonte émaillée qu'on chauffe au bain-marie ou à la vapeur. Il permet d'obtenir des couches d'or aussi épaisses que l'on veut.

Un bain de 1 gramme par litre dépose environ 25 centigrammes par heure sur 1 décimètre cube [2].

1. Les bains acides dégageant des vapeurs dangereuses sont placés dans des cuves en grès, sous une hotte à bon tirage. Ces cuves reposent dans une sorte d'auge en maçonnerie recouverte de ciment où circule constamment de l'eau, de manière qu'on puisse rincer vivement les pièces au sortir de chaque bain.

2. Dans la dorure de la menue bijouterie, où l'on ne dépose que des couches très minces et où l'on a à dorer de très grandes quantités de cuivre, le bain précédent serait rapidement altéré par les traces de cuivre que dissout le cyanure pendant les premiers instants de l'opération.

On préfère alors le remplacer par le bain suivant :

Or en chlorure . . .	10 grammes.	Sulfite de soude. . .	100 grammes.
Cyanure	50 —	Eau	20 litres.
Phosphate de soude.	600 —		

Ces deux derniers sels sont ajoutés pour favoriser la dissolution de l'or

La force électromotrice et l'intensité du courant doivent être très faibles. Il faut environ une chute de potentiel d'un demi-volt entre l'anode et la cathode, et une densité de courant de 1 ampère par 10 décimètres cubes de cathode.

L'*anode* est une lame d'or fin, qu'on plonge plus ou moins dans le bain pour faire varier la résistanse du circuit, et par suite l'intensité du courant. La *cathode* est formée par l'objet à dorer suspendu par un crochet de cuivre à une tringle de cuivre fixe.

Dès que l'épaisseur de la couche est un peu forte — 4 ou 5 décigrammes pour 1 décimètre cube — le dépôt devient mat et terreux : on le ramène au brillant en le frottant avec une brosse de fils de laiton très fins (*grattebosse*).

Remarques. — 1° *Or jaune.* — Le bain normal donne une dorure d'un beau jaune. Si le courant est trop intense, le dépôt prend une teinte rougeâtre.

2° *Or rouge.* — Pour obtenir l'or rouge, il suffit d'ajouter au bain du cyanure de cuivre : il se dépose alors un alliage d'or et de cuivre qui, suivant la proportion du cuivre, prend toutes les teintes, depuis le rose pâle jusqu'au rouge vif.

3° *Or vert.* — L'or vert s'obtient en ajoutant au bain d'or du cyanure d'argent.

4° Les quantités de cyanure de cuivre ou d'argent à ajouter ne peuvent pas être fixées d'une façon précise ; c'est à l'opérateur de faire varier leur quantité et l'intensité du courant suivant la teinte qu'il veut obtenir.

1055. **Argenture.** — Le bain d'argenture est simplement une solution de cyanure double d'argent et de potassium contenant 10 ou 20 grammes d'argent par litre. Il fonctionne à froid.

L'anode soluble est une lame d'argent pur.

Dans les établissements importants, le bain d'argenture est placé dans une grande cuve en bois, ou mieux en tôle doublée de gutta-percha.

Le courant doit avoir deux ou trois volts de force électromotrice et une densité de 50 ampères par mètre carré de cathode.

On dépose ainsi très régulièrement des couches d'argent aussi épaisses qu'on le désire. Pour les couverts de table il faut au moins 3 grammes par pièce pour que l'argenture soit durable.

Remarque. — 1° *Brunissage.* — En sortant du bain, les pièces ont un aspect terreux qu'on fait disparaître avec la grattebosse ; ensuite on les *brunit*.

Cette opération consiste à les frotter énergiquement avec une pierre d'agate bien arrondie, sertie dans un manche en bois, et mouillée constamment avec de l'eau de savon. Cette friction écrase les pores du métal et lui donne le brillant d'un miroir.

On sèche bien les objets dans la sciure de *bois blanc*. — La sciure de *sapin* tacherait la dorure ou l'argenture à cause de la résine qu'elle renferme.

2° *Argent oxydé.* — *Vieil argent.* — On obtient l'argent dit *oxydé* en plongeant l'objet quelques instants dans une solution chaude de sulfure de potassium qui produit une couche superficielle de sulfure d'argent noir. En usant cette surface avec une grattebosse de verre filé, on obtient le ton nommé *vieil argent*.

1056. **Nickelure.** — La nickelure a pris depuis quelques années un développement considérable.

On obtient un dépôt de nickel en plaçant les pièces comme cathode dans une solution à 8° Baumé de sulfate double de nickel et d'ammoniaque.

pour augmenter la conductibilité du bain ; l'anode est une lame de platine. On renouvelle ce bain dès qu'il commence à dorer rouge. Il sert ensuite de bain d'or rouge jusqu'à son épuisement complet.

Le cuivre et ses alliages, l'argent et l'acier poli se dorent très bien dans ces bains. Les autres métaux communs ont besoin d'être cuivrés préalablement.

L'anode soluble est une lame de nickel.

La préparation des pièces pour la nickelure est d'autant plus minutieuse que généralement elles sont polies.

Leur polissage s'est effectué en usant les aspérités au moyen d'un disque de bois tournant à 1 500 ou 1 600 tours à la minute, sur la tranche duquel est collée une bande de buffle qu'on saupoudre d'émeri.

Les pièces sont ensuite présentées à une brosse circulaire tournant avec la même vitesse et qu'on enduit d'un mélange de chaux, de suif et de rouge (colcotar).

On les dégraisse à la benzine, puis on achève de leur donner le brillant avec un tampon de drap tournant toujours à la même vitesse et également enduit de matières grasses.

Il est donc de toute nécessité de bien dégraisser les pièces avant de les mettre au bain.

On n'obtient un dégraissage parfait des objets polis qu'en les frottant avec une brosse double, trempée constamment dans un lait de chaux, jusqu'à ce que l'eau les mouille parfaitement. On les rince alors et on les porte au bain.

Lorsque leur surface commence à se mater, l'épaisseur de nickel est suffisante. On les sèche après les avoir rincées, et on ramène le brillant par un nouvel avivage au tampon de drap.

1057. **Dépôts métalliques divers.** — 1° *Platine.* — On se sert du bain suivant :

Platine transformé en chlorure.	10 grammes.
Phosphate d'ammoniaque	100 —
— de soude.	500 —
Eau distillée	10 litres.

On fait bouillir jusqu'à ce que le précipité qui s'est formé soit dissous, que la liqueur devienne incolore et que l'on ne sente plus l'odeur d'ammoniaque.

L'anode est une lame de platine *qui ne se dissout pas* dans le bain.

On opère de préférence à 70° environ.

Le dépôt est toujours un peu noir, mais le brunissage lui donne le ton du platine laminé.

La platinure n'a que peu d'usages. L'emploi du platine comme protecteur d'un autre métal contre l'attaque des acides n'est pas très bon, car le dépôt électrochimique est un métal poreux sous lequel le métal reste toujours en contact avec les substances corrosives. Toutefois le brunissage, en écrasant les pores du dépôt, augmente sa résistance aux acides.

2° *Étain.* — On peut obtenir sur le cuivre et ses alliages un bon dépôt d'étain d'une certaine épaisseur à l'aide du bain suivant :

Eau distillée.	5 litres.
Pyrophosphate de soude	50 grammes.
Protochlorure d'étain fondu	5 —

L'anode soluble est une lame d'étain.

Depuis quelques années on étame les fils de cuivre qui servent aux canalisations électriques. On se sert du bain suivant :

Lessive de potasse à 3° Baumé	250 litres.
Cyanure de potassium.	100 grammes.
Chlorure d'étain.	60 —

1058. **Sources d'électricité employées.** — On se servait aut

fois des piles de Bunsen ou de Daniell. Mais aujourd'hui, dans les établissements importants, l'électricité est engendrée par une machine dynamo-électrique (1045, 5°), construite de façon à donner une grande intensité sous une faible chute de potentiel : 8 à 10 volts. Le moteur qui fait tourner la dynamo actionne en même temps les tours *à grattebosser*, *à polir* et *à brunir*.

Dans le cas d'une telle installation, il est nécessaire de monter les bains en dérivation, et de mettre dans le circuit de chaque bain une résistance qu'on peut faire varier facilement, et un ampère-mètre.

Il est aussi d'une grande importance de placer sur le circuit général un *brise-courant*. Cet appareil se compose d'un électro-aimant dans lequel passe le courant; une lame de fer munie d'un ressort antagoniste ferme le circuit lorsqu'elle est appliquée sur les pôles de l'électro. Si le courant de la machine vient à baisser, par suite d'un ralentissement du moteur ou pour toute autre cause, le ressort éloigne la lame et le circuit reste ouvert. Sans cet appareil, il pourrait arriver que la force contre-électromotrice des bains, résultant de la polarisation des électrodes, devienne plus grande que la force électromotrice de la dynamo, et les objets placés dans le bain se désargenteraient ou se dénickéleraient.

1059. Applications diverses. — 1° *Affinage du cuivre et d'autres métaux.* — Le cuivre déposé électrolytiquement est très pur, il possède une haute conductibilité et une grande ductilité.

On l'obtient industriellement en prenant, comme anodes d'un bain de sulfate de cuivre, des lames de cuivre impur. En réglant convenablement le courant, le cuivre se dissout et va se déposer sur la cathode pendant que les impuretés tombent au fond de la cuve. Le même procédé permet aussi d'affiner les matières que l'on obtient dans la métallurgie du cuivre. Il existe en France, en Angleterre, en Amérique, en Italie et en Allemagne une trentaine d'affineries, qui fabriquent ensemble 50 tonnes de cuivre électrolytique par jour.

Des procédés analogues permettent d'affiner le plomb et le zinc.

2° *Fabrication du bronze d'aluminium.* — De nombreux procédés sont mis en usage pour fabriquer l'aluminium par l'électrolyse.

Procédé Cowles. — M. Cowles utilise l'électricité à la fois comme source de chaleur et comme agent de décomposition.

Dans un four électrique constitué par une cuve rectangulaire en briques réfractaires on introduit du cuivre, du corindon et du charbon, puis deux grosses électrodes en charbon qui aboutissent au milieu du mélange. On envoie alors un courant de 3000 ampères sous 80 volts qui produit un arc voltaïque dans lequel fond le corindon, qui est alors décomposé par le charbon et par l'électricité. L'aluminium produit s'allie au cuivre en formant un bronze d'aluminium. Cette opération dure une heure et l'on obtient 1 kilogramme d'aluminium pour 46 chevaux-heure.

Procédé Héroult. — Il est analogue au précédent; il est employé à Froges (Isère).

Procédé Minet. — Ce procédé donne l'aluminium par par l'électrolyse, à 1000° environ, d'un mélange de cryolithe et de sel marin. La cuve est en fonte et

placée en dérivation sur la cathode de façon à être recouverte constamment d'une légère couche d'aluminium qui la protège contre l'action du bain. Les électrodes sont en charbon et sous la cathode est un vase dans lequel tombe l'aluminium.

On opère avec un courant de 4 à 6 volts et de 30000 ampères par mètre carré d'électrode.

3° *Fabrication des hypochlorites.* — On a aussi appliqué l'électrolyse à la fabrication des hypochlorites alcalins pour le blanchiment des étoffes et de la pâte à papier, à la fabrication de l'hydrogène, au tannage, etc.

ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES.

1060. **Piles primaires** et **Piles secondaires. — Accumulateurs.** — De la Rive a constaté le premier que des lames de platine, ayant servi à transmettre le courant d'une pile ordinaire, dit *courant primaire*, dans un liquide décomposable, puis étant retirées de ce liquide et plongées dans de l'eau distillée, donnent naissance à un nouveau courant qui est *inverse* du courant primaire et qu'on appelle *courant secondaire* ou *courant de polarisation*. Matteucci démontra plus tard que cette force électromotrice inverse était due à des couches de bulles d'oxygène et d'hydrogène, déposées et *accumulées* respectivement sur chaque lame.

Les piles à deux liquides avaient été imaginées par Becquerel pour supprimer les effets de la polarisation. Planté chercha, au contraire, à les utiliser, en recueillant le courant secondaire qui en résulte. Il constitua ainsi des électromoteurs d'un nouveau genre, qu'il appela *piles secondaires*.

Le courant observé par de la Rive est le type des courants secondaires; l'ensemble des deux électrodes de platine et du bain d'eau distillée constitue une *pile secondaire*. Toute pile secondaire est encore appelée *accumulateur*, parce qu'elle *accumule* l'électricité sous la forme des produits chimiques résultant du passage des courants primaires.

1061. **Accumulateurs** et **Batteries secondaires Planté.** — *Principe.* — Ayant substitué aux électrodes de platine des électrodes en plomb, Planté constata que la force électromotrice secondaire correspondante était plus énergique et plus constante que celle de tous les autres métaux, et qu'elle atteignait le double de celle d'un Grove ou d'un Bunsen. Il n'y avait donc qu'à accroître la surface des électrodes, de manière à en diminuer la résistance, pour avoir un accumulateur d'une grande puissance.

Construction d'un accumulateur Planté. — Il enroulait d'abord, autour d'un cylindre en bois ou en métal, deux lames de plomb séparées par deux ou trois bandes de caoutchouc (fig. 959) ; puis il enlevait le rouleau intérieur et il maintenait les spires en place en interposant de petits croisillons en gutta-percha ramollis par la chaleur. Le couple était introduit dans un vase cylindrique en verre rempli d'eau acidulée (*au dixième en volume*), et son

Fig. 959.

jetti à l'intérieur par de petites cales en gutta-percha. Cet élément secondaire Planté avait une superficie de 1 mètre carré.

Charge. — On charge l'élément ordinaire en y faisant passer le courant d'au moins deux éléments Bunsen ou trois éléments Daniell. Le travail du courant *s'accumule* sous la forme de peroxyde de plomb d'une part, et, d'autre part, de plomb réduit et pulvérulent. La limite de charge est atteinte, dans un couple *bien formé*, lorsque les bulles de gaz commencent à se dégager.

1062. Batteries secondaires Planté. — Planté construisit en outre une batterie d'accumulateurs, dite batterie secondaire, en coupant vingt de ses élé-

ments (fig. 960). L'appareil était muni d'un *commutateur*, qui permet de coupler à volonté les éléments soit en tension, soit en quantité. Ce dernier couplage réduit au $\frac{1}{20}$ la résistance de la batterie : on en profite pour la charger en faisant passer le courant de la pile primaire. Quand la charge est effectuée, on rétablit le couplage en tension; les forces électromotrices de chaque élément s'ajoutent alors, comme dans une pile de Volta, et l'on a une force électromotrice totale 20 fois plus grande qu'avec un seul élément.

1063. Formation des accumulateurs. — Modifications de l'accumulateur Planté. — On doit faire subir à tout accumulateur une opération préalable des plus importantes : c'est celle de la *formation*.

Elle consiste à peroxyder le plus profondément possible la lame de plomb

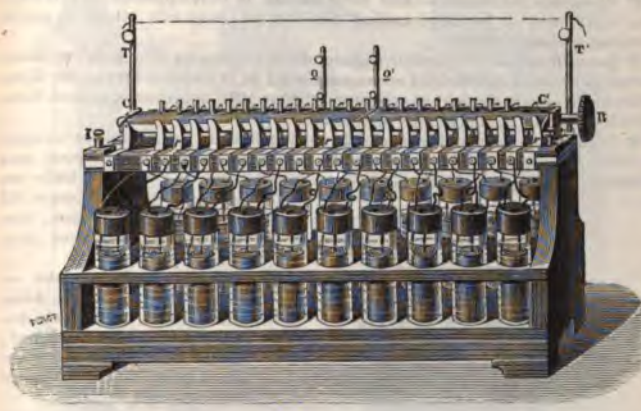


Fig. 960.

positive, et à transformer la lame négative, sur la plus grande épaisseur possible, en plomb réduit, spongieux ou cristallin. On y parvient en renversant, par intervalles, le sens du courant primaire pendant la charge. La puissance de l'appareil dépend en grande partie de la manière dont la formation a été conduite.

1° *Perfectionnement de Planté*, — M. Planté a indiqué un premier perfectionnement, qui consiste soit à chauffer les bains de formation, soit à décaper préalablement les lames de plomb en les plongeant, de vingt-quatre à quarante-huit heures, dans un bain d'acide azotique étendu d'eau (moitié de son volume). L'attaque par l'acide donne aux plaques une certaine porosité qui facilite l'action ultérieure du courant de charge.

2° *Perfectionnement de M. Faure.* — M. Faure a proposé de recouvrir préalablement les deux lames de plomb d'une couche de minium (Pb^3O^4), maintenue au moyen de lames de feutre ou de flanelle. Sous l'action du courant primaire, le minium se transforme rapidement en peroxyde (PbO^2) sur la lame positive, et en plomb spongieux (Pb) sur la lame négative : les deux lames actives sont ainsi plus vite obtenues et l'accumulateur plus vite formé.

Les divers modèles d'accumulateurs, déjà très nombreux, se rapportent tous à l'un de ces deux types. Ils sont diversifiés, soit, dans le premier type, par

dimensions ou la disposition des électrodes en plomb ; soit, dans le deuxième type, par le procédé qui rend les matières actives additionnelles solidement adhérentes aux électrodes. Parmi les premiers, nous citerons l'accumulateur *Peyrusson* ; parmi les autres, l'*accumulateur Gadot*.

1064. Constantes des accumulateurs au plomb. — Quels que soient d'ailleurs la constitution et le mode de formation des divers accumulateurs au plomb, leurs constantes sont sensiblement les mêmes.

1° *Force électromotrice.* — Pendant les premiers instants qui suivent la charge, la force électromotrice dépasse souvent 2,5 volts ; deux minutes après, elle est déjà descendue à 2,10 volts ; et pendant les deux tiers de la durée de la décharge, elle reste supérieure à 1,9 volt.

2° *Résistance intérieure.* — Elle varie suivant le développement des lames, leur écartement et la concentration des liquides, mais elle atteint à peine *quelques centièmes* d'ohm.

3° *Quantité totale d'électricité emmagasinée.* — Dans un accumulateur bien formé, la quantité d'électricité *emmagasinée* est de 10 ampères-heures par kilogramme de plomb. On peut en retrouver 90 pour 100 à la décharge, surtout lorsqu'elle succède à la charge sans interruption.

4° *Capacité.* — La capacité dépend du régime de débit ; elle diminue lorsque le débit augmente. Aussi on peut doubler le débit normal, calculé pour une décharge en dix heures ; mais alors les accumulateurs sont vidés en trois ou quatre heures. La capacité varie suivant les types, depuis 5 ampères-heures jusqu'à 20 par kg.

5° *Rendement électrique.* — De bons accumulateurs, bien formés, bien traités, et déchargés en régime normal, ont un rendement de 90 pour 100 en quantité et de 80 pour 100 en énergie.

Fig. 961.

1065. Accumulateur Peyrusson. — Ce modèle tout récent (fig. 961) est construit de manière à éviter l'une des causes de détérioration les plus actives, à savoir : les courts-circuits, qui nécessitent généralement une surveillance des plus assidues dans la conduite de ces appareils.

L'électrode positive *b* est formée d'une tige centrale, autour de laquelle rayonnent toutes les lames positives. L'électrode négative *b'* est formée de lames de plomb, plissées et fendues de telle sorte que l'action électrique s'exerce sur les deux faces. Ces lames sont reliées entre elles par des bandes et deux anneaux, l'un supérieur et l'autre inférieur, en plomb antimonié, qui par des soudures autogènes constituent un tout rigide d'une grande solidité.

L'accumulateur ne comporte qu'une seule électrode positive ayant la forme d'un cylindre et une électrode négative représentée par un cylindre creux dans

lequel pénètre l'électrode positive; des couvercles en porcelaine maintiennent les deux électrodes à la distance de quelques millimètres et rendent tout contact impossible. Un pied en porcelaine P isole l'électrode positive du vase extérieur, en grès ou en verre, qui est soigneusement isolé du sol.

1066. **Accumulateur Gadot.** — Dans cet appareil, la matière active (minium) est en pastilles, qui sont emprisonnées dans des alvéoles entre les moitiés d'une même plaque, qui est subdivisée en deux parties parallèles.

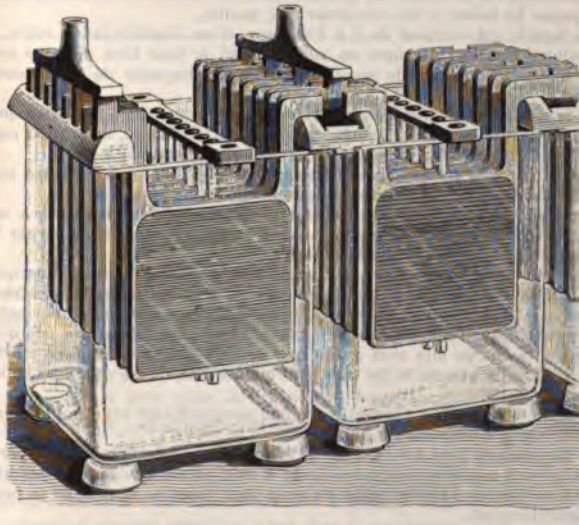


Fig. 962.

Dans le dernier type [1], dit *à plaques jumelles démontables* (fig. 962), le dispositif est combiné de manière à éviter le plus possible les courts circuits. Les plaques sont suspendues par le haut, de sorte qu'il reste un grand espace vide entre le bord inférieur des plaques et le fond des vases, où les détritus métalliques peuvent s'entasser sans produire de jonctions métalliques entre les plaques (courts circuits).

De plus, dans ce nouveau montage, M. Gadot a écarté absolument l'emploi des matières sujettes à se détériorer ou se déformer, comme le bois, le caoutchouc, les boulons, vis, écrous, etc.

1067. **Instruction pour l'entretien des accumulateurs.** — Nous empruntons aux Notices de M. Gadot les instructions pratiques si indispensables pour l'entretien d'une batterie d'accumulateurs. Elles peuvent s'appliquer, à peu de chose près, à tous les systèmes.

1. Le pôle positif de chaque accumulateur est généralement marqué en rouge

1. *Brevet du 5 septembre 1893.*

et le pôle négatif en noir. De temps en temps on doit soigneusement nettoyer les contacts et vérifier le serrage des boulons ou des entretoises[1].

2. Les accumulateurs doivent être installés, sans se toucher entre eux, sur un plancher ou sur une étagère en bois bien sec et reposer chacun sur trois ou quatre isolants en porcelaine ou en verre.

On ne saurait attacher trop d'importance à l'isolement des accumulateurs : c'est une condition essentielle de leur bon fonctionnement.

3. On évitera de les mettre dans une salle humide, sombre ou peu accessible ; — au contraire on fera tout son possible pour les installer de telle manière qu'on puisse les visiter et les entretenir avec facilité.

4. Le liquide est composé de 6 à 7 volumes d'eau distillée ou de pluie, et de 1 volume d'acide sulfurique au soufre à 66°, le tout bien mélangé avec un morceau de bois ou de verre, parce qu'une baguette de métal serait attaquée.

L'acide vendu dans le commerce peut n'être pas exactement à 66° ; il est donc de toute nécessité de vérifier le mélange au pèse-acide Baumé, lequel doit marquer 17° à 18° dans le liquide une fois refroidi (densité : 1,134 à 1,142).

Le liquide ne sera versé dans les accumulateurs qu'une fois le mélange bien refroidi et vérifié ; il devra immerger complétement les plaques.

5. La charge des accumulateurs d'un type déterminé devra se faire à une intensité maximum, proportionnée à ce type, et généralement indiquée par les constructeurs ; il ne faut jamais la dépasser.

Quant à la tension du courant de charge, nous dirons, à titre de renseignement, qu'elle doit être, au début, d'environ 2,2 à 2,3 volts par accumulateur (en supposant la batterie montée en tension), dans des circonstances normales. — Du reste cette tension varie selon la période où l'on se trouve : au commencement de la charge elle n'est guère que de 2,1 volts, vers le milieu elle est de 2,2 à 2,3 volts et vers la fin elle peut monter jusqu'à 2,4 volts sans jamais dépasser 2,6 volts.

Remarques. — On peut reconnaître qu'un accumulateur est complètement chargé lorsqu'il bouillonne sensiblement.

Mais le moyen le plus usité est de se rendre compte du nombre d'ampères-heures qu'on a mis dans l'accumulateur : il doit excéder de 15 à 20 pour 100 le nombre d'ampères-heures qu'on en veut tirer (dans les limites de sa capacité naturellement).

En résumé, un électricien attentif fera un usage judicieux de ces trois moyens, qui peuvent se contrôler mutuellement.

6. La décharge des accumulateurs d'un type déterminé se fera à un régime maximum indiqué par le constructeur ; cette décharge peut se faire à une intensité moindre, et cela n'en vaut que mieux pour les accumulateurs.

7. Toute décharge doit absolument être interrompue aussitôt que la tension de chaque accumulateur s'est abaissée à 1,8 volt.

8. Il est de la plus grande importance que les plaques de noms contraires ne se touchent jamais dans un même vase et qu'il ne s'y forme pas de courts-circuits.

On peut être sûr de l'existence d'un court-circuit lorsqu'une fois chargé, et en repos, l'accumulateur ne donne pas résolument une tension d'au moins 1volt,95 à 2 volts.

Aussitôt qu'on s'est aperçu d'un court-circuit, on doit passer avec précaution une latte de bois entre les plaques, afin d'enlever ou de faire tomber au fond du vase le corps qui provoque ce court-circuit.

9. On doit vérifier le liquide des accumulateurs au pèse-acide toutes les trois

1. Dans certains types (entre autres les Tudors, les *Peyrussons*) on remplace avantageusement les boulons et les entretoises par une soudure autogène.

ou quatre semaines et remplacer ce qui peut manquer de liquide (par suite d'évaporation ou de toute autre cause) par de l'eau pure ou bien par de l'acide sulfurique au soufre, selon les indications du pèse-acide.

On doit agiter le liquide avec une petite latte de bois avant la vérification qui doit se faire après une charge et lorsque le degagement gazeux a cessé.

10. Si les accumulateurs ont à rester quelques semaines ou quelques mois sans fonctionner, on enlevera l'eau acidulée et on la remplacera par de l'eau pure, qui devra, comme le liquide acidulé, baigner complètement les plaques.

CHAPITRE XV

APPLICATIONS INDUSTRIELLES

—

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE.

1068. **Régulateurs, bougies et lampes électriques.** — Tout système d'éclairage électrique comprend deux organes : le générateur d'électricité et la lampe.

Le premier générateur d'électricité qui ait été employé pour l'éclairage est une pile de Bunsen, formée d'au moins 40 éléments. Depuis l'invention des machines d'induction, on ne se sert plus de piles que lorsqu'on ne peut pas faire autrement, car c'est à la fois la plus incommode et la plus coûteuse des sources d'électricité. Les diverses machines de Gramme décrites ci-dessus et beaucoup d'autres modèles sont des générateurs d'électricité qui peuvent être appropriés à tous les procédés d'éclairage. Les accumulateurs sont aussi fort employés à l'éclairage; mais ils ne dispensent pas de l'usage des machines dynamo-électriques, puisque c'est avec elles qu'on doit les charger.

Les *lampes électriques* se divisent en deux grandes catégories, suivant qu'elles utilisent l'*arc voltaïque* ou simplement l'*incandescence* des conducteurs traversés par les courants.

Celles qui utilisent l'arc voltaïque sont :

1° Les *régulateurs électriques*;

2° Les *bougies électriques*.

Les uns et les autres ont pour fonction de prévenir l'extinction qui se produirait nécessairement dans l'arc, par suite de l'usure et de l'éloignement progressifs des charbons. On y parvient dans *les régulateurs à l'aide* d'un mécanisme réglé par le courant lu

même, qui rapproche les pointes opposées des deux charbons au fur et à mesure de leur combustion.

Dans les bougies électriques on juxtapose parallèlement les baguettes de charbon, au lieu de les superposer, et on emploie des *courants alternatifs* qui, produisant la même usure sur chacun des charbons, en laissent les pointes toujours en regard.

On a utilisé l'incandescence que produit le passage du courant dans les conducteurs résistants, soit *à l'air libre*, et alors il y a usure plus ou moins rapide par combustion ; soit *dans le vide*, et alors l'usure est considérablement diminuée : de là deux sortes de lampes à incandescence :

1° Les *lampes à incandescence avec combustion*, aujourd'hui abandonnées ;

2° Les *lampes à incandescence sans combustion*, dont l'usage est de plus en plus répandu.

1069. **Charbons employés pour l'arc voltaïque.** — Foucault a substitué le charbon des cornues au charbon de bois employé par Davy. Aujourd'hui les charbons sont formés d'un aggloméré de coke en poudre, de noir de fumée et d'un sirop de gomme et de sucre très épais, qui a été séché à haute température après avoir été comprimé et passé à la filière. On les taille en crayons de diamètres variables qui sont parfois recouverts de cuivre ou de nickel par voie d'électrolyse, ce qui augmente beaucoup leur durée. Le crayon positif, généralement placé à la partie supérieure de l'arc, reçoit parfois, suivant son axe, une *mèche* formée d'un charbon de composition différente et beaucoup plus tendre que la partie extérieure. L'usure des charbons à mèche se fait d'une façon plus régulière. On sait que le crayon positif s'use deux fois plus vite environ que le négatif, lorsqu'on emploie les courants continus. L'usure des deux crayons est la même si l'arc est alimenté par des courants alternatifs et *et si les charbons sont horizontaux* ; dans la position verticale, le charbon supérieur s'use un peu plus vite que le charbon inférieur et dans le rapport de 108 à 100.

1070. **Force électromotrice de l'arc voltaïque.** — En mesurant la différence de potentiels entre les deux crayons d'un arc voltaïque, pour des écartements l variables, on trouve qu'elle varie avec l depuis 30 volts jusqu'à 70 volts. On trouve, en outre, qu'elle se compose d'une somme de deux termes, l'un constant a, l'autre sensiblement proportionnel à l ; on a donc

$$e = a + Kl.$$

La constante a, — égale à environ 35 volts, — a été appelée *force électromotrice de l'arc* et attribuée par Thompson à la volatilisation du carbone du charbon positif. Le second terme est la chute de potentiel ir due à la résistance r de l'arc.

Soit i l'intensité du courant qui alimente l'arc, la puissance consommée par l'arc a pour valeur ei watts. Si, par exemple, $e = 50$ volts et $i = 14,6$ ampères, l'arc absorbe une puissance de 750 watts, c'est-à-dire environ 1 cheval-vapeur. Il est économique, au point de vue de la quantité de lumière recueillie, d'utiliser des arcs absorbant une plus grande puissance.

1071. **Régulateur de Foucault et Duboscq.** — Cet appareil, inventé par Foucault, fut construit et perfectionné par Duboscq. Il fut le premier en date

des régulateurs *à point lumineux fixe*.

Les deux porte-charbon T, T' (fig. 963) sont montés sur des tiges à crémaillère, et deux roues dentées, concentriques, p, p', entraînées d'une manière continue par un mécanisme d'horlogerie (r, g), impriment aux deux crémaillères des mouvements en sens inverse, d'où résulte le contact des deux charbons c, c' : à ce moment il y a arrêt, et le circuit du courant est fermé. Le courant continu du générateur arrive dans l'appareil par la borne R et en sort par la borne R' après avoir suivi le chemin suivant : borne R, fil q, bobine BB, tige T, charbons c et c', tige T', support S et borne R'.

Dès que le courant passe, l'arc voltaïque s'allume entre les pointes, tout petit d'abord, puis de plus en plus grand, à mesure que les charbons se consument.

Dès que l'arc est formé, les pointes ne butent plus l'une contre l'autre, et le mouvement d'horlogerie devrait repartir pour les rapprocher; mais il n'en est pas ainsi, grâce à un *électro-aimant* animé par la bobine BB. Aussi longtemps que le courant a une intensité suffisante, un contact K est attiré et arrête le mécanisme, par l'intermédiaire du levier coudé F'L et du butoir *lm* qui appuie directement sur le régulateur g du rouage. Mais dès que l'intensité du courant est affaiblie par suite de l'agrandissement ou de la rupture de l'arc, le contact K est arraché par l'effet d'un ressort antagoniste r, le mécanisme est déclenché, et les charbons se rapprochent de nouveau jusqu'au contact.

Ce régulateur a été construit pour utiliser le courant continu des piles. Dans ce cas, le charbon positif s'usant environ *deux fois plus vite* que l'autre, le point lumineux ne peut rester sensiblement fixe qu'autant que la pointe positive se déplace deux fois plus que la pointe négative. *On obtient* aisé-

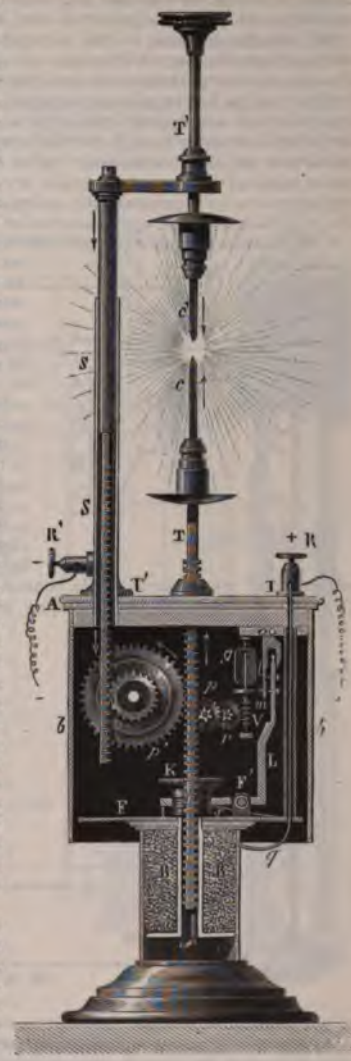


Fig. 963.

ment ce résultat en donnant à la roue dentée qui commande la première crémaillère un diamètre double de celui de l'autre roue.

1072. **Régulateur Serrin.** — C'est un régulateur du même genre que le précédent, mais plus simple : il n'y a pas de ressort moteur. L'effet du mécanisme d'horlogerie y est produit directement par le poids du porte-charbon supérieur.

1073. **Principe des régulateurs polyphotes ou à division.** — Les régulateurs du type précédent sont appelés quelquefois *monophotes*, parce qu'on n'en peut placer qu'un seul dans le courant de l'électromoteur. On appelle régulateurs *polyphotes* ceux qui sont indépendants l'un de l'autre, de manière qu'on en puisse placer plusieurs dans un même circuit. Il y a deux solutions : celle de M. Lontin, appliquée dans les régulateurs, dits *à dérivation*, de Lontin, Mersanne, Gramme, etc., et celle de Siemens, appliquée dans les lampes dites *différentielles*.

1° *Régulateurs polyphotes à dérivation.* — Le charbon positif A (fig. 964) et son porte-charbon CD, mobiles autour du point C, sont en équilibre entre deux attractions contraires, celle d'un électro-aimant S et celle d'un ressort antagoniste r; le charbon négatif B est fixe. Le courant vient par C, passe dans l'arc de A en B, et se rend ensuite à un autre régulateur placé dans le circuit principal. Entre le point C et le charbon B est établie une dérivation : c'est là qu'est placé l'électro-aimant régulateur. La quantité d'électricité qui entre en C dans la dérivation est *proportionnelle* à la *résistance* du circuit principal CAB. Or, tant que l'arc a une faible longueur, la résistance du circuit principal est médiocre, et le courant dérivé qui anime l'électro-aimant n'a pas assez d'intensité pour provoquer le rapprochement du contact M. Au contraire, dès que l'arc prend une longueur exagérée, l'intensité du courant dérivé et, par suite, celle du magnétisme augmentent, la résistance du ressort r est vaincue et le charbon est rapproché. D'ailleurs, ces variations d'intensité ne se produisent à la fois que dans la dérivation et dans la portion correspondante CAB du courant principal : au delà du point B, elles ne se font pas sentir, et *ne peuvent pas influer sur la marche des autres appareils.*

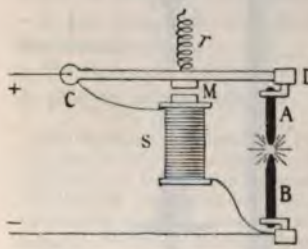


Fig. 964.

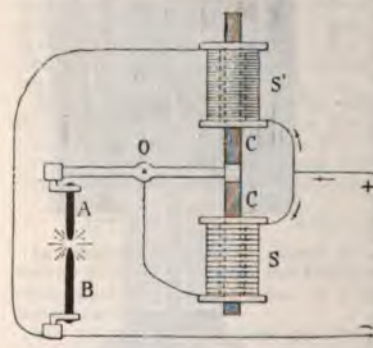


Fig. 965.

2° *Régulateurs polyphotes différentiels.* — L'un des charbons, A (fig. 965), est porté par un levier oscillant; les oscillations sont produites par la différence des attractions de deux solénoïdes S et S' sur un cylindre vertical de fer doux CC, qui fait équilibre au porte-charbon A. Le courant principal passe dans le solénoïde S, qui est à gros *fil*, et par suite peu résistant; le solénoïde S', qui est à fil fin et à nombreuses résistances

beaucoup plus grande, est placé en dérivation. Pour un écart normal des charbons, les attractions se compensent, et le levier est horizontal. Dès que l'écart dépasse une certaine limite, la résistance de l'arc et par suite celle du circuit principal augmentent, et l'intensité du courant diminue en S, tandis qu'elle augmente en S' dans la même proportion ; les attractions varient dans le même sens, le levier, attiré par S', bascule autour du point O, et les charbons se rapprochent : quand ils ont repris leur écart normal, les résistances des deux circuits reprennent leurs valeurs initiales et les attractions s'équilibrent de nouveau. Le régulateur Siemens a été le premier construit sur ce principe

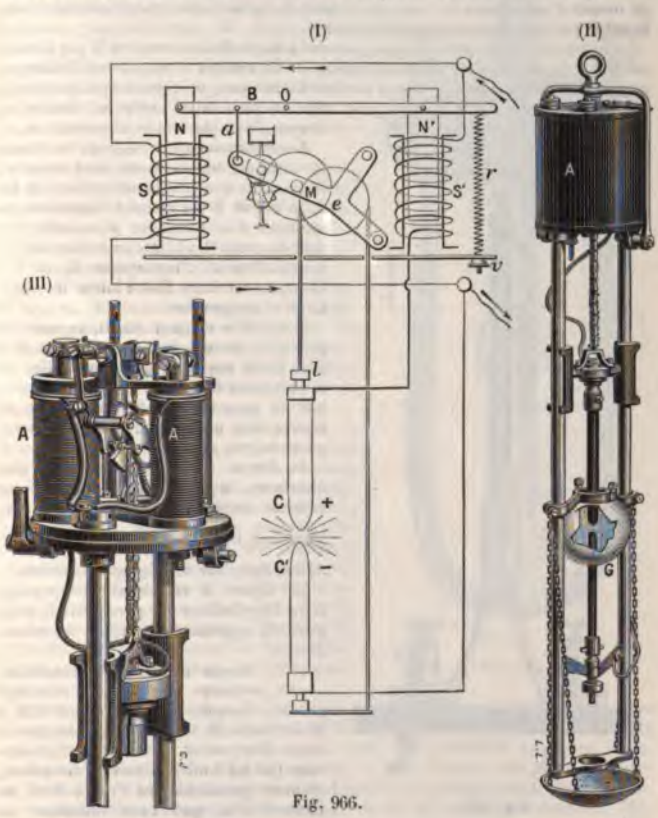


Fig. 966.

1074. **Lampe à arc Japy-Helmer** (*à point lumineux fixe*). — Cette lampe est le type du régulateur différentiel maintenant constant le rapport de la différence de potentiels *e*, aux bornes, à l'intensité I du courant qui la traverse.

Description. — Un solénoïde S en fil fin (fig. 966, I), placé en dérivation aux

bornes de la lampe, aspire le noyau de fer doux N; un second solénoïde S' à gros fil, traversé par le courant principal, aspire le noyau de fer doux N'; les actions exercées par les deux solénoïdes S et S' sur les noyaux N et N' sont transmises à un balancier B, aux deux extrémités duquel ces noyaux sont suspendus; ce balancier B constitue un véritable fléau de balance.

L'appareil est réglé de telle sorte que, pour la valeur normale du rapport $\frac{e}{l}$ le balancier B soit dans une position d'équilibre à très peu près horizontale. Les porte-charbons, guidés par les tiges verticales (fig. II), sont reliés mécaniquement au moyen d'une chaîne de Galle qui s'enroule sur une roue motrice dentée commandée par le mouvement d'horlogerie M.

Le balancier B commande l'échappement à ancre du mouvement M par l'intermédiaire de la biellette d'accouplement *a*. Un ressort *r* maintient l'échappement immobile lorsque la lampe ne fonctionne pas; ce ressort sert en même temps au réglage de la lampe : pour cela, on peut faire varier sa tension au moyen de la vis *v* et et de son écrou.

Fig. 967.

Fonctionnement. — Lorsqu'on lance le courant, les charbons sont séparés; le courant traverse le solénoïde à fil fin S, le noyau N est attiré à l'intérieur du solénoïde; le balancier B bascule autour du point O, abaisse en même temps le mouvement d'horlogerie M, et l'échappement étant libéré laisse les charbons se rapprocher.

Aussitôt le contact établi, le courant principal circule dans le solénoïde S' à gros fil; le noyau N' se trouve attiré et le balancier B bascule en sens inverse : par ce mouvement, l'échappement se trouve calé et le mouvement d'horlogerie relevé, ce qui produit l'écart.

Au fur et à mesure de l'usure des charbons, le solénoïde N est attiré et ramène ainsi chaque fois l'arc à une longueur telle que $\frac{e}{l}$ prenne la valeur déterminée par un réglage préalable.

La figure II représente le régulateur Japy-Helmer en perspective; la figure III représente le détail du mécanisme.

1075. **Bougie électrique Jablochkoff.** — La première solution de l'éclairage par les bougies électriques est due à M. Jablochkoff. Sa bougie se compose de deux charbons *a* et *b* (fig. 967), verticaux (de 2 à 4 millimètres de diamètre), disposés parallèlement l'un à côté de l'autre. Afin que l'arc voltaïque ne puisse jaillir qu'aux extrémités, et non en deux points voisins quelconques des deux charbons, ceux-ci sont séparés par une cloison isolante, appelée colombin, formée d'un métange agglutiné de plâtre et de kaolin; leurs pointes sont reliées par une masse *n*, composée de charbon pulvérisé, agglutiné avec une dissolution de gomme

On fait entrer et sortir le courant par les bornes A et B : il monte dans le charbon *a*, enflamme l'amorce et redescend par *b;* en même temps l'arc voltaïque se forme en *n*, et l'extrémité de la cloison isolante fuse et se volatilise, s'abaissant autant que les charbons. Si l'on employait un courant continu, le charbon positif s'userait deux fois plus vite que le négatif et l'extrémité *a* baisserait plus vite que *b*, ce qui amènerait promptement la rupture de l'arc. Mais avec des courants alternatifs les deux charbons s'usent sensiblement avec la même vitesse. L'arc n'est donc pas rompu, puisqu'il conserve une longueur à peu près constante, mais le point lumineux s'abaisse graduellement. Ce déplacement n'offre pas d'inconvénients pour l'éclairage des théâtres, des grands établissements, des rues et des places publiques, mais il rend l'appareil inapplicable aux phares et à toutes les expériences de physique qui nécessitent un point lumineux fixe.

Les constantes d'une bougie Jablochkoff de 4 mm de diamètre en service normal, sont les suivantes (d'après M. J. Joubert) :

Intensité du courant : 8 à 9 ampères.

Chute de potentiel aux bornes : 42 volts.

Puissance électrique : 54 à 59 kgm.

Les bougies de 25 cm ont une durée de 2 heures. M. Gadot a supprimé la main-d'œuvre du changement de bougie en montant toutes les bougies en dérivation : la résistance des amorces, très variable d'une bougie à l'autre, suffit pour amener l'allumage successif.

1076. **Brûleur Jamin.** — 1° *Principe.* — L'arc voltaïque est fixé aux extrémités des charbons parallèles, sans mécanisme ni matière interposée, au moyen du courant lui-même, par sa propre action électrodynamique. Pour cela le courant circule plusieurs fois autour des charbons avant d'y entrer, de manière que les portions qui sont en regard soient de même sens (fig. 968). Il est facile de voir, d'après les lois de l'électrodynamique, que tous les côtés du circuit concourent à chasser l'arc voltaïque vers les pointes et à l'y maintenir.

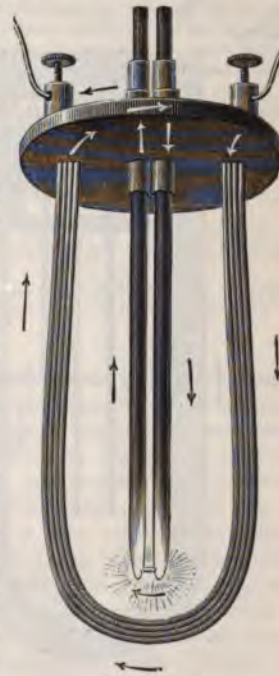


Fig. 968.

2° *Description détaillée.* — La lampe est portée sur une plaque d'ardoise, que l'on peut fixer dans des globes ou dans des lanternes (fig. 968). A cette plaque est fixée également, d'une part, vers le bas, une gouttière de cuivre, large, mais peu épaisse (afin d'éviter les ombres), et, vers le haut, une autre gouttière en fer doux destinée à s'aimanter et à attirer une palette mobile EF (fig. 969). Le courant alternatif passe d'abord dans un fil de cuivre fin (diamètre $\frac{12}{10}$), replié 15 ou 20 fois dans les deux gouttières, et qui constitue un circuit directeur analogue au multiplicateur d'un galvanomètre. C'est au milieu de ce cadre et dans son plan que se placent les *bougies* : elles se réduisent à des *couples de charbons parallèles* entre lesquels va jaillir l'arc; il y a ordinairement *quatre couples (fig. 969). On* introduit chacun de ces charbons dans un tube de

cuivre : ils s'y tiennent verticalement, la pointe en bas, serrés par un ressort. On les emploie tels qu'ils sortent de la fabrique, sans aucune préparation préalable. On sait que c'est le courant lui-même qui est chargé de maintenir l'arc voltaïque fixé à la pointe de chaque bougie.

Les charbons de droite (fig. 969) sont mobiles, les charbons de gauche sont fixes. La mobilité des uns et la fixité des autres sont dues à une position particulière de leurs gaines. Celles des premiers sont fixées à une palette en fer doux EF, mobile comme un levier autour du point O, et qui les entraîne toutes les quatre dans ses mouvements; les autres gaines sont fixes.

3° *Allumage et rallumage.* — A

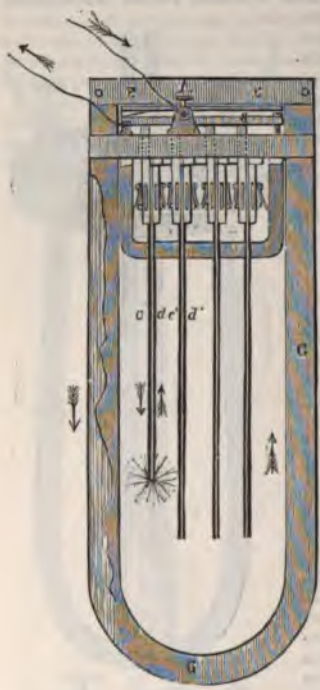


Fig. 969.

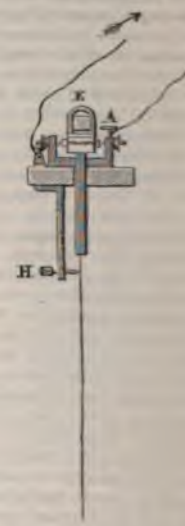


Fig. 970.

l'état de repos, la palette est entraînée par le poids des charbons qu'elle porte et elle descend jusqu'à ce que l'un des charbons mobiles, le plus long ordinairement, vienne buter contre le charbon fixe qui lui correspond. Si on lance alors le courant, celui-ci, après avoir parcouru le circuit directeur de la lampe, arrive aux charbons mobiles et passe sur l'un des quatre charbons fixes. Aussitôt que le circuit est fermé, l'aimantation naît, la palette EF est attirée et les quatre couples de charbons se séparent à la fois : trois d'entre eux restent froids et obscurs, et le quatrième s'allume. L'arc s'y produit instantanément, et y persiste tant qu'il y a du charbon à brûler, toujours maintenu entre les pointes par l'action électrodynamique du circuit directeur, et y revenant sans cesse lorsqu'une cause intérieure l'en a chassé. Quand le courant cesse de pas-

ser, l'aimantation s'évanouit, la palette retombe et le contact entre les charbons se rétablit; si le courant passe de nouveau, les charbons se rallument et s'écartent comme la première fois. Ainsi l'allumage est *automatique*, *instantané* et *renouvelable* à volonté.

4° *Substitution des bougies.* — Quand la première bougie est consumée, il faut qu'une autre lui succède. Le passage de l'arc à la bougie suivante s'effectue encore *automatiquement*. Jamin avait imaginé plusieurs systèmes : il a fini par adopter le suivant, dû à M. Mondos, ingénieur attaché à son laboratoire. En H, derrière l'un des charbons et à une faible distance (fig. 970), est placée une pointe métallique, reliée métalliquement à la borne de sortie. Dès que la bougie est suffisamment usée pour que l'arc voltaïque vienne lécher la pointe métallique, une dérivation s'établit spontanément entre celle-ci et le charbon voisin : le courant revient alors directement à la source sans passer par le circuit, la palette retombe, deux charbons neufs se mettent en contact et il y a rallumage comme ci-dessus.

5° *Avantages du brûleur Jamin.* — Ce brûleur réunit donc plusieurs qualités essentielles :

a. Chaque bougie s'allume et se rallume *automatiquement*, autant de fois qu'on le veut.

b. Il n'est besoin que d'un seul circuit pour toutes les bougies voisines.

c. Il y a remplacement automatique de chaque bougie brûlée par l'une des bougies voisines.

d. On n'y emploie aucune matière isolante ayant, comme dans la bougie Jablochkoff, le double inconvénient d'altérer la couleur de la lumière et d'augmenter considérablement la dépense.

1077. Lampes électriques à incandescence sans combustion. — Le principe commun à tous les systèmes consiste à faire passer un courant, continu ou alternatif, dans un conducteur *assez mince* et *assez résistant* pour devenir incandescent, *assez rigide* pour ne pas être brisé et fléchi par dilatation, *assez réfractaire* pour n'être ni fondu ni volatilisé. On enferme le conducteur en vase clos, à l'abri de l'air en général, soit dans le vide, soit dans un hydrocarbure, pour le soustraire à la combustion. Les premiers essais, faits avec des fils de platine pur ou iridié, ne donnèrent que des résultats médiocres. Les résultats pratiques ont été obtenus à l'aide de minces filaments de charbon. Les lampes fondées sur ce principe sont déjà nombreuses : on peut citer celles d'Edison, de Swan, de Lane Fox et de Hiram Maxim. Elles ne diffèrent entre elles que par la forme du filament ou par la fabrication du charbon. Nous décrirons celle d'Edison, qui est l'inventeur de ce procédé d'éclairage.

1078. Lampe Edison. — Le charbon est contourné en boucle ou en fer à cheval (fig. 971). C'est un filament de bambou calciné à haute température, en vase clos[1].

1. Parfois on *nourrit* le filament en le submergeant dans un hydrocarbure gazeux et en y faisant passer un courant. Au rouge l'hydrocarbure se décompose *et le carbone se précipite* sur le filament en le couvrant d'une couche graphi-

Le filament étant en place dans l'ampoule, on fait le vide dans celle-ci, au moyen de pompes à mercure, et on le pousse jusqu'à 1 à 2 centièmes de millimètre.

Les deux bouts du fer à cheval se renflent un peu et viennent se prendre dans de petites pinces de platine *a* et *b*, terminaisons de fils de platine *q* et *p*, qui amènent le courant électrique au charbon. Le tout est *soudé* au moyen d'un dépôt charbonneux séché, pur, carbonisé. Ces fils de platine sont bien plus gros que le fil de charbon, pour ne pas rougir; mais ils s'échauffent tout de même, et, par suite, grossissent quand la lampe est en fonction. Lorsqu'on l'éteint, ils s'amincissent en refroidissant et reviennent à leur diamètre primitif.

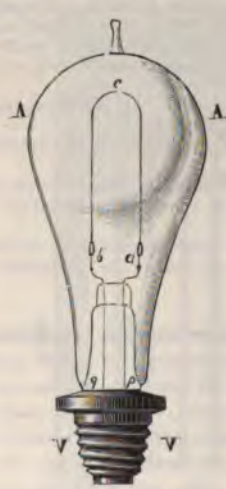


Fig. 971.

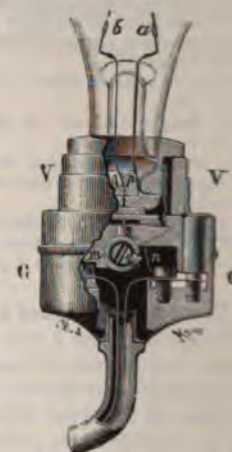


Fig. 972.

Ces rhéophores traversent en *p* et *q* (fig. 972) une masse de plâtre qui forme le pied de la lampe et qui porte un pas de vis V par où l'on peut la fixer sur un support approprié, candélabre, applique, etc. Les deux électrodes qui amènent le courant viennent aboutir à deux bornes métalliques *m* et *n*, cachées dans la gaine. Il suffit de tourner un robinet commutateur placé dans la gaine où en un point du circuit pour allumer ou éteindre la lampe.

Constantes des lampes à incandescence. — On fabrique des lampes à incandescence de toutes dimensions donnant des intensités lumineuses qui varient d'une faible fraction de bougie à plusieurs milliers de bougies.

Les *lampes normales* sont de 16 bougies; elles fonctionnent ordinairement avec un courant de 0,8 ampère et de 100 à 110 volts.

On fabrique aussi de *petites lampes* de 1 à 8 bougies qui fonctionnent à 0,8 ou 1 ampère et sous 3 à 30 volts; et de *grosses lampes* de 150 à 1000 bougies, qui

toïde dure et compacte. Comme l'échauffement est plus grand aux points où la section est la plus faible, c'est là que le dépôt est le plus grand. Le nourrissage rend donc la section plus uniforme.

fonctionnent sous un voltage de 50 à 100 volts et d'une intensité de 6 à 25 ampères.

Durée normale. — Une lampe normale de 16 bougies doit avoir une vie de 1000 heures.

Puissance normale. — La puissance absorbée par une telle lampe est donc

$$100 \times 0{,}8 = 80 \text{ watts, environ } \frac{1}{9} \text{ de cheval-vapeur.}$$

Résistance normale. — Comme on a $e = ri$, la résistance de la lampe en marche est égale à

$$\frac{e}{i} \text{ ou } \frac{100}{0{,}8} = 125 \text{ ohms.}$$

CHAPITRE XVI

APPLICATIONS INDUSTRIELLES

—

TÉLÉGRAPHIE.

1079. **Définitions : télégraphes, télautographes et téléphones.** — L'une des applications les plus étonnantes de l'électricité, c'est, sans contredit, la transmission instantanée et à de grandes distances de la pensée humaine, sous ses deux modes d'expression, l'écriture et le langage articulé.

L'ensemble des procédés qui résolvent le premier problème constitue la *télégraphie* et la *télautographie*; l'ensemble des procédés qui résolvent le second constitue la *téléphonie* : les appareils employés dans le premier cas s'appellent *télégraphes* et *télautographes*; ceux qui servent dans le deuxième cas sont les *téléphones*.

1080. **Historique et principe des télégraphes électriques.** — Dès le siècle dernier, plusieurs physiciens avaient proposé de correspondre à distance au moyen de l'électricité fournie par les machines électriques.

En 1811, Sœmmering imagina un télégraphe fondé sur l'emploi de l'électrolyse de l'eau comme moyen indicateur.

En 1820, à une époque où l'électro-aimant n'était pas encore connu, Ampère, appliquant l'expérience d'Œrsted, proposa de correspondre au moyen d'aiguilles aimantées au-dessus desquelles on dirigerait un courant : on aurait employé autant d'aiguilles et de fils qu'il y a de lettres.

En 1837, Steinheil à Munich et Wheatstone à Londres construisaient des télégraphes à plusieurs fils agissant chacun sur une aiguille aimantée; la source du courant était un appareil électromagnétique de Clarke ou une pile. Steinheil imagina de plus le *retour du courant par la terre*. Mais le télégraphe électrique ne devint pratique que par l'emploi d'électro-aimants, imaginé par Wheatstone *en 1840*.

1081. Classification des appareils télégraphiques. — Les systèmes télégraphiques imaginés depuis l'origine de la télégraphie électrique sont très nombreux; mais il en est relativement peu qui aient pu satisfaire aux exigences de la pratique et nous ne nous occuperons que de ceux-ci.

Les systèmes représentant les lettres de l'alphabet au moyen de signaux conventionnels peuvent se diviser en deux grandes catégories :

1° Le système Morse et ses dérivés, dans lesquels les lettres sont représentées par les *répétitions* et *combinaisons de deux signes élémentaires distincts et indépendants*;

2° Les systèmes dans lesquels chacun des signes élémentaires est différencié par *le moment* où il se manifeste; on désigne aussi ces appareils sous le nom d'*appareils à synchronisme*.

Dans les appareils appartenant à ces deux catégories, les signaux reçus à l'arrivée peuvent être simplement *indiqués* par l'appareil récepteur (*appareils à signaux fugitifs*), et dans ce cas les opérations de *traduction* et de *transcription* incombent à l'agent préposé à la réception dans le poste d'arrivée.

Les signaux reçus peuvent aussi être *enregistrés* sous forme de *traces conventionnelles* par l'appareil récepteur lui-même (*appareils à signaux enregistrés*), et le travail incombant à l'agent préposé à la réception est le même que dans le cas précédent. Il est vrai que l'enregistrement automatique des signaux dispense d'en effectuer la traduction au fur et à mesure de leur arrivée, et fournit un moyen de contrôle très apprécié dans certains cas.

Les signaux reçus peuvent être *traduits automatiquement* et *imprimés* en caractères typographiques par l'appareil lui-même (*appareils imprimeurs*), ce qui ne laisse à l'agent récepteur que le soin de recueillir le télégramme parvenu sous cette forme.

Enfin, certains systèmes télégraphiques, dits *appareils rapides* ou *à grand rendement*, permettent d'effectuer sur un fil de ligne unique un nombre de transmissions supérieur à celui qu'un seul agent peut transmettre ou recevoir (appareils à transmission automatique, et appareils à transmissions multiples)[1].

1082. Organes divers d'un télégraphe électrique. — Les parties essentielles de tout télégraphe électrique sont :

1° Le *générateur de courant* : piles, accumulateurs ou dynamos;

2° Le *fil de ligne*, qui transmet le courant d'une station à l'autre;

3° Le *manipulateur*, qui règle les intermittences du courant à la station de départ;

4° Le *récepteur*, qui enregistre les dépêches à la station d'arrivée;

5° Des organes accessoires : *relais*, *translateurs*, *traducteurs*, *sonneries*, *rhéostats*, *parafoudres*, etc.

1083. Fil de ligne. — On distingue les *lignes aériennes*, *souterraines* et *sous-marines*.

Ligne aérienne. — La ligne aérienne consiste en un fil de *fer galvanisé*, de 3 à 5 millimètres de diamètre, suivant la longueur des lignes. On emploie aussi des conducteurs en cuivre allié à du

1. Nous nous sommes servi, pour la rédaction de ce chapitre, du Excellent Cours de télégraphie professé par M. Émile Baudot à l'École supérieure de Télégraphie.

phosphore, de 1 à 4 millimètres de diamétre. Ces fils sont supportés par des cloches isolantes (fig. 973) portées par des consoles fixées à la partie supérieure de poteaux qui sont plantés à des intervalles de 50 à 100 mètres.

Ligne souterraine. — D'une façon générale, le conducteur employé dans les lignes souterraines est formé au moyen de plusieurs fils de cuivre (3, 5 ou 7) de petit diamètre, tordus ensemble de manière à former un toron. Ce toron est couvert d'une épaisse couche de gutta-percha, ordinairement constituée par plusieurs couches superposées et réunies ensemble par de la *composition Chatterton*. La gutta-percha est protégée au moyen d'un *guipage* constitué par l'enroulement de brins de jute et de rubans de coton imbibés de goudron de bois. Le conducteur ainsi garni constitue l'un des *brins* d'un *câble* qui généralement en comprend 3, 5 ou 7, suivant les endroits où ils doivent être déposés (en égout, en tunnel ou en pleine terre).

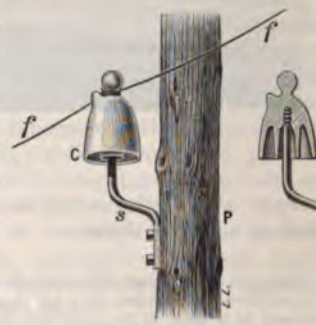


Fig. 973.

Les câbles eux-mêmes sont protégés d'une façon différente. En égout et en tunnel ils sont le plus ordinairement munis d'une enveloppe en plomb ; en pleine terre on fait usage de *câble armé*, ainsi nommé parce qu'il est garni d'une *armature* formée par des fils de fer enroulés en hélice.

Les lignes souterraines à grandes distances sont constituées par des câbles armés ou par des câbles sous guipage, enfilés dans des tubes en fonte analogues à ceux qui servent pour les canalisations d'eau, et enfouis dans le sol à une profondeur de 1 mètre environ. De distance en distance et en des points connus, une chambre est ménagée pour faciliter les recherches en cas de dérangement.

Ligne sous-marine. — La ligne sous-marine est constituée par un câble armé, à un seul ou à plusieurs conducteurs, établis comme ceux des lignes souterraines ; les câbles de grande longueur sont ordinairement à un seul conducteur. L'enveloppe protectrice de celui-ci est faite avec beaucoup de soin au moyen de couches concentriques d'étoupes et de chanvre imprégnés de sulfate de cuivre. Les fils de fer et d'acier de l'armature extérieure sont eux-

mêmes recouverts de chanvre goudronné (fig. 974 et 975), et la force de cette armature est proportionnée aux efforts destructeurs auxquels elle devra résister dans les fonds où elle sera im-

Fig. 974.

Fig. 975.

mergée; aussi distingue-t-on les *câbles côtiers* des *câbles de grand fond* qui sont plus légers.

Remarque. — En dehors des causes de rupture résultant du frottement continu des câbles sur les roches, dans les parages où des courants continuels agitent les eaux de la mer, et de celles qui peuvent résulter d'un accrochage par une ancre de navire, les lignes sous-marines ont à subir les attaques du *taret*, un infiniment petit animal qui perfore la gutta-percha à travers les interstices de l'armature. Les trous ainsi creusés sont microscopiques; mais, comme dans certaines régions ils se comptent par milliers, il en résulte une altération appréciable de l'isolant du conducteur, lequel se trouve alors en communication avec l'eau de mer. Les décompositions chimiques produites en ces points par l'action des courants électriques activent du reste la détérioration et rendent en peu de temps le câble inutilisable.

1084. **Retour par le sol.** — Dans tous les systèmes de ligne, on fixe au pôle négatif de la pile, à la station de départ, un fil de cuivre terminé par une plaque de même métal, qu'on fait plonger dans l'eau d'un puits. Le pôle positif communiquant avec le fil de ligne se termine, à la station d'arrivée, par une plaque semblable à la première et plongeant aussi dans l'eau d'un puits. Il se produit dans le fil de ligne la même circulation électrique que si le circuit était fermé par un fil de retour. Cette disposition offre donc le double avantage d'éviter l'emploi de ce fil, — ce qui est une économie, — et de rendre la résistance moindre.

1085. **Générateurs de courants.** — *Pile Callaud* et *Pile Meidinger*. — Parmi les piles employées au service des appareils télégraphiques, nous citerons en première ligne la pile Callaud, dont nous avons décrit ci-dessus (917) l'élément. L'élément *Meidinger*, qui est une variante de celui-ci, est employé en Allemagne.

Pile Leclanché. — L'élément Leclanché, du modèle ordinaire avec zinc en bâton et vase poreux rempli de charbon et de bioxyde

de manganèse), est aussi très employé pour les lignes dont le trafic est relativement peu important. Un débit soutenu l'épuiserait rapidement et sa force électromotrice serait trop variable pour les cas où une grande constance est indispensable. La pile peut, sans inconvénient, se prêter à un assez grand débit quand elle est préparée pour cet usage.

Pile-bloc. — La *pile-bloc* est une sorte de pile sèche, ou du moins étanche, utilisant les propriétés du *cofferdam* (pulpe contenue dans les noix de coco), qui absorbe et conserve une quantité de liquide actif suffisante pour dissoudre une plaque de zinc pur amalgamé d'assez grandes dimensions. Elle comprend les mêmes éléments que la pile Leclanché, mais enveloppés par une toile caoutchoutée et comprimés fortement dans une boîte en bois, hermétiquement close et paraffinée.

Nous citerons encore l'élément de *Lalande et Chaperon* (à oxyde de cuivre et solution de potasse caustique) et l'élément *Fuller* (zinc amalgamé, charbon, eau accidulée et bichromale de potasse), employé en Angleterre par le Post Office.

Remarques. — 1° *Emploi des dynamos.* — Il est à prévoir, d'après des essais heureux tentés en Amérique, en Angleterre, en France et en Allemagne, que, dans les grands centres tout au moins, tous ces générateurs d'électricité seront à bref délai remplacés par des accumulateurs, périodiquement chargés au moyen de machines dynamos.

2° *Intensité des courants télégraphiques.* — Le courant, envoyé par le poste expéditeur, et mesuré au départ, a généralement, en France, une intensité de 12 à 20 milli-ampères : c'est ce qu'on appelle le *courant d'action*. Celui qui agit sur le récepteur, le *courant reçu*, n'atteint que de 20 p. 100 à 70 p. 100 du courant d'action, à cause des pertes dues aux dérivations, à la longueur de la ligne, à l'état de l'atmosphère; le récepteur ne reçoit donc que de 3 à 8 milli-ampères.

1086. Piles en cascade. — Il n'est pas toujours indispensable que chaque ligne télégraphique soit desservie par une pile spéciale. La même source peut en effet desservir plusieurs lignes; il suffit pour cela que sa résistance intérieure soit assez faible pour que son potentiel aux points de contact avec les lignes ne soit pas diminué sensiblement lorsqu'elle fournit un débit maximum.

Ces conditions sont réalisées, avec des éléments de pile des modèles ordinaires, par un groupement qui est quelquefois désigné sous le nom de *piles en cascade* ou *en échelle d'Amsterdam*. Dans ces piles, expérimentées tout d'abord en Hollande, les diverses rangées d'éléments n'ayant pas la même longueur, l'ensemble figure en effet un escalier ou une échelle.

Soit à desservir 10 lignes de faible longueur, 6 lignes de longueur moyenne, et 3 lignes longues, exigeant respectivement des forces électromotrices de

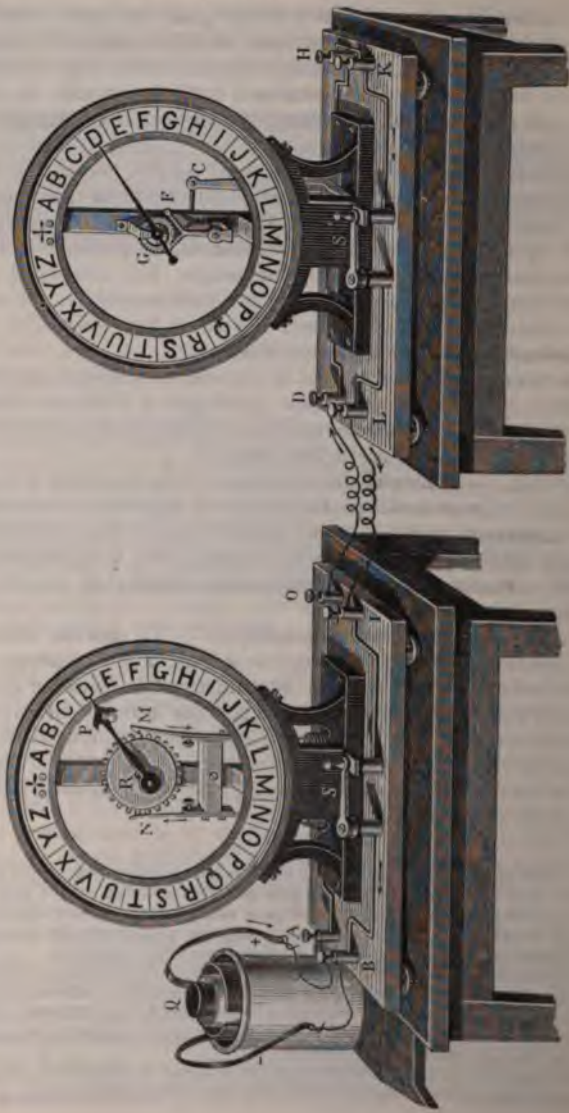


Fig. 973.

Fig. 974.

8 volts, 16 volts et 25 volts, et par conséquent en tout 251 éléments Callaud environ : le groupement en échelle permet de les desservir avec moins de 100 éléments, et par conséquent de réaliser une économie de plus de 150 éléments.

1087. Télégraphe à cadran ou à lettres : système Bréguet. — Il existe plusieurs sortes de télégraphes à cadran. Celui qui est représenté dans les figures 976 et 977 est un appareil de démonstration; mais le principe en est le même que celui des télégraphes de Bréguet établis dans les gares et dans beaucoup de petits bureaux.

L'appareil se compose essentiellement d'un manipulateur (fig. 976) et d'un récepteur (fig. 977). Les deux appareils sont munis chacun d'un cadran portant les 25 lettres de l'alphabet, sur lequel se meut une aiguille. C'est l'expérimentateur qui fait tourner, à la main, l'aiguille de la station de départ; mais c'est l'électricité qui actionne celle de la station d'arrivée.

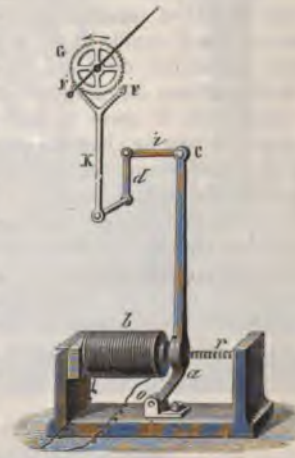


Fig. 978.

Récepteur. — Le courant, venant de la station de départ (fig. 976), à travers le manipulateur NRM et le fil de ligne OD, entre dans le récepteur (fig. 977) dont le mécanisme, masqué dans la figure 977, est représenté à part dans la figure 978. Un électro-aimant, fixé horizontalement par une extrémité, attire une autre armature de fer doux *a*, qui fait partie d'un levier coudé mobile autour de son point d'appui *o*, tandis qu'un ressort à boudin *r* sollicite le même levier en sens contraire.

Lorsque le courant passe, l'électro-aimant attire le bras de levier *a*C, dont l'autre bras *i* vient agir sur un second levier *d*, mobile autour d'un axe horizontal, et qui commande une fourchette FF′. Lorsque le courant est interrompu, le ressort *r* ramène *a*C, et en même temps toutes les pièces qui en dépendent : d'où résulte pour la fourchette un mouvement de va-et-vient qui se communique à une roue à rochet G, ayant 26 dents et portant sur son axe l'aiguille indicatrice. D'après l'inclinaison

de ses dents, à chaque oscillation double du levier aC la roue G est entraînée d'une dent, toujours dans le même sens, par une des branches de la fourchette, au moyen de boulons qui s'engagent dans les dents.

Manipulateur. — C'est à l'aide du manipulateur (fig. 976) qu'on produit les intermittences de l'électro-aimant. La roue R porte 26 dents, dont 25 correspondent aux lettres de l'alphabet, et la dernière à un intervalle, marqué par une croix, réservé entre les lettres A et Z. Quand on fait tourner la roue R en tenant le bouton P à la main, l'extrémité de la lame N, d'après sa courbure, est toujours en contact avec les dents; la lame M, au contraire, se terminant par une came taillée, il y a successivement contact et solution de continuité. Par conséquent, si l'on fait avancer l'aiguille P de 4 lettres, par exemple, le courant passe quatre fois de N en O, et quatre fois il est interrompu. L'électro-aimant du récepteur devient donc quatre fois attractif, et quatre fois il cesse de l'être. Donc la roue G a tourné de 4 dents, et comme chaque dent correspond à une lettre, l'aiguille du récepteur avance exactement d'un même nombre de lettres que celle du *manipulateur*.

Quant le mot est fini, on amène l'aiguille B sur la croix, ce qui reproduit le même mouvement sur le cadran du récepteur.

Chaque appareil est muni d'une *sonnerie électrique*, à l'aide de laquelle le poste de départ annonce au poste d'arrivée qu'une dépêche va être transmise, et d'un interrupteur de courant S.

1088. **Télégraphes à signaux enregistrés. — Système Morse et ses dérivés.** — 1° *Manipulateur.* — Dans l'*appareil Morse* proprement dit, le signal est formé par la manœuvre du *levier-manipulateur*.

Fig. 979.

C'est un levier articulé ab (fig. 979) susceptible d'osciller entre

un butoir *b*, dit *butoir de repos*, contre lequel un ressort l'appuie en temps ordinaire, et un second butoir *x*, dit *butoir de travail*, sur lequel il vient prendre un point d'appui quand il est abaissé par la main de l'opérateur. La *durée* de l'abaissement du levier, et par conséquent la durée du contact qui en résulte entre lui et son butoir de travail, peut être *brève* ou *longue* : c'est ainsi que sont constitués les deux éléments du *Code de signaux Morse*.

2° *Récepteur*. — Les émissions de courant de la station de dé-

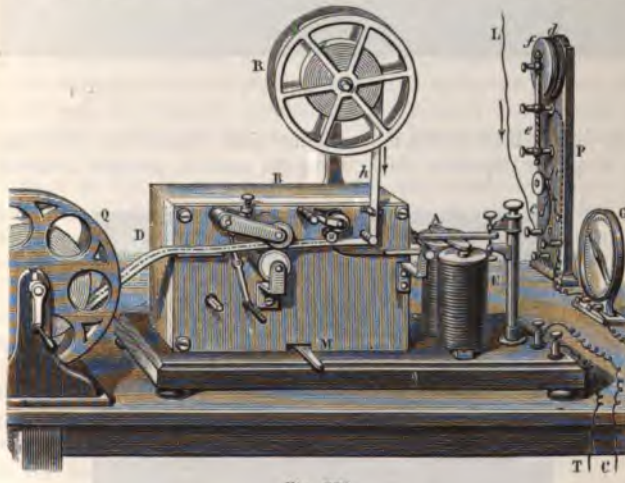


Fig. 980.

part vont agir sur le récepteur de la station d'arrivée. Un levier *l* portant l'armature A de l'électro-aimant E (fig. 980 et 983) est muni d'un prolongement *u* dont l'extrémité recourbée se présente au-dessous et assez près de la tranche d'une roue mince *m* ; celle-ci est continuellement encrée par son contact permanent avec un rouleau en feutre *e* (fig. 983), imbibé d'encre oléique noire ou bleue. La roue *m* est désignée sous le nom de *molette* et le rouleau *e* sous le nom de *rouleau encreur*. Tous deux tournent sous l'action d'un rouage d'horlogerie dont ils font partie et qui est enfermé dans la boîte BD. Un rouleau de papier R, suspendu en dessus, fournit une bande continue de papier *h*, qui passe au contact de l'extrémité de la lame recourbée u, et est entraînée avec une vitesse uniforme par deux cylindres C, C, remplissant l'office

de laminoirs (fig. 983). On conçoit que toute attraction de l'armature A par l'électro-aimant E aura pour effet de soulever la bande de papier jusqu'à l'amener au contact de la molette encrée :

Fig. 981.

celle-ci lui abandonnera assez d'encre pour former une trace dont la longueur dépendra de la durée du contact, puisque la bande

Fig. 982.

continue son mouvement de progression pendant ce temps. Les signaux brefs effectués à l'aide du manipulateur au départ seront donc enregistrés à la station d'arrivée par des traces de faible

longueur (*points*), et les signaux longs par des traces plus longues (*traits*).

Il existe un grand nombre de dispositifs ayant tous pour objet de déposer sur la bande de papier des traces colorées; celui dont le principe vient d'être exposé est le modèle employé dans l'Administration française des Télégraphes. Le modèle anglais fait porter la molette encrée sur un levier articulé commandé par l'armature.

Remarque. — Le rythme suivant lequel sont effectués les signaux de l'appareil Morse est indiqué par le schéma (fig. 981), dans lequel les divisions de l'axe des temps Ox correspondent à des *seizièmes* de seconde. C'est une vitesse moyenne pratique.

3° *Lecture des signaux Morse. — Tableau du Commandant Perein.* — Un ingénieux tableau (fig. 982), dû au commandant Perein, permet, soit de traduire rapidement les signaux Morse, soit de composer facilement les signaux représentant des lettres à transmettre.

Pour la composition des signaux représentant telle ou telle lettre, on va du point de départ, marqué des flèches, à la lettre à représenter, en suivant les lignes ponctuées qui conduisent et en prenant les signaux qu'on rencontre en route.

Soit, par exemple, la lettre *k*, à laquelle on ne peut parvenir qu'à travers les signes ▬ ▬ ▬ formant le signal complexe qui en réalité sert à la représenter.

Soit maintenant à traduire le signal complexe ▬ ▬ ▬ ▬. On part de la flèche et l'on suit les lignes passant successivement par un point, puis un trait, un second trait, puis encore un point, et l'on arrive ainsi à la lettre *p* dont le signal en question est bien la représentation.

Dans le Code Morse, les chiffres sont formés par 5 signes, et les signes de ponctuation par 6.

1089. Installation complète d'un poste Morse (*arrivée et départ*). — **Opération.** — Par sa partie médiane (fig. 983), le levier L du manipulateur est relié en permanence au fil de ligne; de plus, quand il est abaissé par la main de l'agent transmetteur, il se trouve aussi en communication, par son butoir de travail B_t, avec l'un des deux pôles de la pile P, dont l'autre pôle est *à la terre*. Il en résulte une fermeture du circuit de cette pile à travers le fil de ligne et par conséquent l'envoi d'un courant électrique à la station d'arrivée.

Là le circuit de ligne se continue par le manipulateur, par son butoir de repos B_r, par les bobines de l'électro-aimant E et se ferme enfin par la terre. En traversant l'électro-aimant, le courant de la ligne détermine une attraction de l'armature A qui est montée sur un levier *l* articulé en *o*. Ce levier s'abaisse alors; il tend le ressort *r* qui le tenait soulevé et, quittant son butoir de repos, vient au contact de son butoir de travail. A partir de ce moment il est facile de voir *que tous les mouvements* du manipulateur au départ seront fidèlement *reproduits par le levier-récepteur l*, car, lorsque l'employé laissera remonter le

levier manipulateur, le courant de la pile P cessera d'être envoyé sur la ligne, et l'armature de l'électro-aimant E cessant d'être attirée remontera sous l'action du ressort *r* jusqu'au contact de son butoir de repos. Il suffirait donc d'observer les mouvements du levier récepteur pour traduire les signaux effectués au départ; mais il est préférable de les enregistrer.

Remarque. — On voit bien, d'après le dispositif des appareils dans chaque station, pourquoi le courant lancé de la station de départ ne peut influencer le récepteur de la même station.

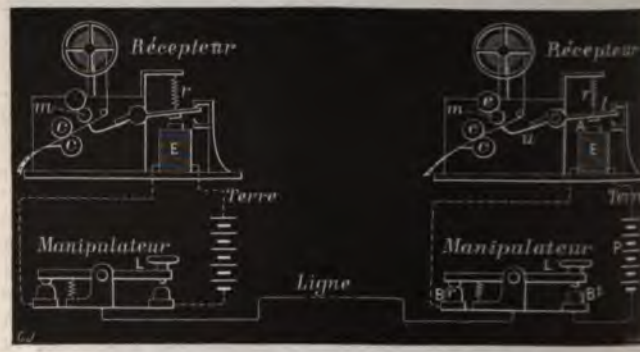


Fig. 983.

1090. **Organes accessoires.** — L'installation d'un poste télégraphique complet comporte un grand nombre d'organes accessoires dont la forme est extrêmement variée suivant les systèmes. Nous décrirons des types simples des accessoires les plus importants.

Fig. 984.

1° *Parafoudre* — Le parafoudre est un appareil destiné à préserver les

ployé du télégraphe contre la foudre en temps d'orage. On le voit en place (fig. 980), fixé sur une planchette verticale P, près d'un récepteur Morse.

Deux bornes de laiton P et Q (fig. 984) sont en communication, la première avec le fil de ligne L, la seconde avec les appareils par le fil A. D'une borne à l'autre est disposé un tube d'ébonite *ab*, sur lequel s'enroule un fil de fer très fin, qui conduit le courant de P à Q. Au pied de la borne P est une plaque de cuivre D, dentelée dans toute sa longueur; latéralement et très rapprochée est une plaque identique C, en communication avec la terre par le fil T.

Lorsque, sous l'influence d'orages, la tension électrique deviendrait assez grande sur le fil de ligne pour donner des étincelles redoutables, la plaque D, qui est dans le circuit, donne écoulement par ses pointes à l'électricité vers la lame C et de là dans le sol, sans danger pour les employés voisins. Si, malgré cette décharge continue, le courant devient trop intense, le fil de fer enroulé de *a* en *b* s'échauffe jusqu'à fondre, interrompant ainsi toute communication électrique entre les appareils et la ligne.

On peut, à volonté, mettre le parafoudre en dehors du circuit, à l'aide d'un commutateur à manette M.

Remarque. — Les parafoudres, qui suffisent pour préserver les employés, sont insuffisants pour arrêter les courants accidentels que les aurores boréales, les orages magnétiques, les courants terrestres excitent dans les fils, courants qui parfois deviennent assez intenses pour troubler tout à fait la transmission des dépêches.

Fig. 983.

2° *Sonnerie électrique (à trembleur).* — La *sonnerie électrique* est un petit appareil qui sert à prévenir le poste auquel on expédie. On en construit de plusieurs sortes; nous décrirons (fig. 983) la *sonnerie à trembleur*, également employée dans les postes téléphoniques et dans les appartements.

Une planchette disposée verticalement porte un électro-aimant E, dans lequel arrive, par une borne *m*, soit le courant de ligne, soit celui d'une pile locale. De là le courant gagne une lame élastique d'acier *c*, qui porte l'armature *a* de l'électro-aimant, puis une lame de laiton C en contact avec l'armature, et revient à la pile par la borne *n*.

Chaque fois que le courant passe dans l'électro-aimant, l'armature est attirée et entraîne avec elle un marteau P, qui frappe un timbre T et le fait résonner. Or, au moment du choc, le contact cesse entre l'armature *a* et la lame C et, le courant étant ouvert, l'électro-aimant devient inactif; mais la lame d'acier *c* ramène aussitôt l'armature en contact avec la lame C, le courant passe de nouveau, et ainsi de suite, avec une grande rapidité, tant que le courant arrive à la sonnerie.

1091. **Relais.** — Si les deux postes qui correspondent sont très éloignés l'un de l'autre, il peut arriver que le courant ne soit plus assez fort pour faire *fonctionner les pièces qui inscrivent la dépêche.* On a recours alors à un relais, *organe accessoire qui, recevant* le courant de ligne, introduit dans le récepteur

le courant d'une *pile locale*, laquelle se substitue à la pile de la station de départ pour actionner le mécanisme du récepteur.

Le courant de ligne, entrant dans l'appareil par la borne L (fig. 986), se rend dans un électro-aimant E, d'où il va à la terre par la borne T. Or, chaque fois que le circuit est fermé, l'électro-aimant attire une armature A, fixée à la partie inférieure d'un levier vertical *p*, qui est lié à un axe horizontal tournant entre deux vis à pivot.

A chaque oscillation, le levier *p* vient buter à sa partie supérieure contre un bouton *n*, et à cet instant le courant de la pile locale vient animer l'électro du récepteur en passant par la borne *c*, la colonne *m*, le levier *p*, la tige *c*, la borne Z, d'où il sort par le fil T (fig. 980) pour revenir à la même pile locale. Puis, quand le courant du fil de ligne s'interrompt, l'électro-aimant du relais n'étant plus actif, le levier *p*, entraîné par un ressort à boudin *r*, s'écarte du bouton *n* (comme le montre la figure 986), et le courant de la pile locale ne

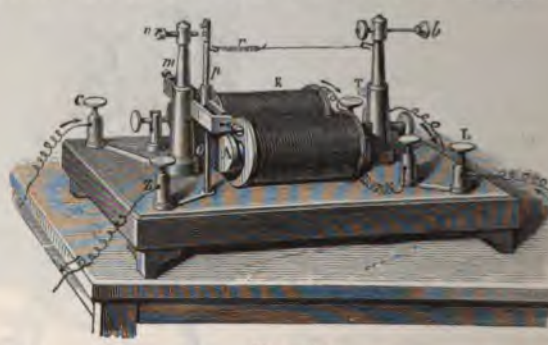


Fig. 986

passe plus. On voit donc que le relais transmet au récepteur exactement les phases de passage et d'intermittence du manipulateur du poste expéditeur.

Relais polarisés. — On peut employer dans certains cas des *relais polarisés*, ainsi nommés parce que leur armature mobile est un aimant. De cette façon selon le sens du courant émis, ou provoque une attraction ou une répulsion de l'armature.

1092. Télégraphes imprimeurs. — Principe du système Hughes. — Le système Morse est le meilleur des télégraphes au point de vue de la simplicité et de la solidité, mais il n'est pas le plus rapide. On est obligé, en effet, de faire en moyenne trois signaux par lettre. Aussi a-t-on cherché à combiner des systèmes donnant *une lettre* par chaque émission de courant : c'est ce qu'on appelle les *télégraphes imprimeurs*. Le plus connu est celui du professeur américain Hughes.

Le mécanisme de ce télégraphe est assez compliqué, mais le principe en est très simple. Aux deux stations se trouvent deux mouvements d'horlogerie qui doivent marcher ensemble, avec un synchronisme parfait, de manière à régler le fonctionnement simultané du manipulateur et du récepteur. Ce dernier consiste essentiellement en un disque métallique horizontal, qui porte en relief sur son contour les lettres de l'alphabet : c'est la roue des types. Elle tourne d'une manière continue tout près d'une bande de papier qui se déroule, comme dans le récepteur Morse. Un électro-aimant, qui s'anime chaque fois qu'on émet

le courant dans le fil de ligne, presse le papier contre la roue des types : la lettre qui passe à ce moment, et qui est constamment imprégnée d'encre grasse, s'imprime alors sur la bande. L'émission du courant est faite, à la station de départ, à l'aide d'un *manipulateur spécial*, qui se compose essentiellement d'un clavier, analogue à celui des pianos, portant, gravées sur ses touches, les mêmes lettres que la roue des types. Les deux appareils étant réglés, l'expéditeur envoie successivement, en jouant sur le clavier, les lettres dont se compose la dépêche, et celles-ci s'impriment simultanément dans les deux postes. Les bandes imprimées sont alors découpées, collées sur une feuille de papier et livrées telles quelles au public.

1093. **Télégraphes à transmission rapide.** — Le système Hughes n'est pas encore assez expéditif, du moins sur les grandes lignes, pour les besoins de la correspondance télégraphique. On a dû inventer plusieurs systèmes pour accélérer, dans une grande proportion, la transmission des dépêches sur un même fil de ligne. Ces divers systèmes peuvent être classés en trois groupes :

1° Les *transmetteurs automatiques*, dont le type est le *transmetteur Wheatstone* ou *Jacquard électrique*;

2° Les *transmetteurs multiples*, dont le type est le *télégraphe Baudot*;

3° Les systèmes de transmission simultanée, connus sous les noms de systèmes *duplex*, *diplex* et *quadruplex*.

1094. **Jacquard électrique.** — *Principe.* — On prépare d'avance les dépêches, en dehors de la ligne, puis on les transmet, par séries, d'une manière continue, et *automatiquement*.

Appareil Wheatstone. — L'appareil inventé par Wheatstone ressemble extérieurement à un métier Jacquard : de là son nom. L'organe qui sert à préparer les dépêches s'appelle le *perforateur*, car cette préparation consiste à *perforer* les bandes de trous qui sont alignés et espacés de manière à permettre la transmission en caractères Morse (fig. 987). La ligne des trous du milieu sert à l'engrenage d'un disque denté qui, en tournant, entraîne et déroule la bande d'une manière continue. Les deux autres lignes de trous forment les *points* et les *traits* de l'alphabet Morse : deux trous placés vis-à-vis l'un de l'autre forment un point; deux trous en diagonale indiquent un trait. Par conséquent, *une dépêche perforée* devra être d'abord traduite en caractères Morse, avant *d'être exprimée en écriture ordinaire.*

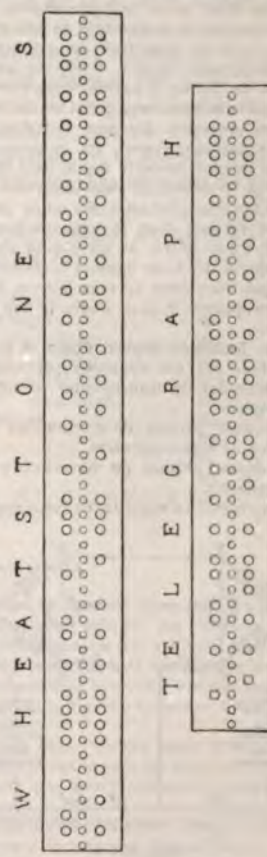


Fig. 987.

1095. **Transmetteurs multiples. — Appareil Baudot.** — Le principe de ces appareils, dont le plus parfait est celui de M. Baudot, est le suivant : diviser la durée de la transmission en intervalles réguliers et périodiques, dont chaque période est affectée à un manipulateur distinct ; un certain nombre d'employés utilisent donc le fil de ligne chacun à son tour, de sorte que, tandis que les temps d'activité et de repos se succèdent pour eux périodiquement et rapidement, le fil de ligne reste en activité d'une manière continue.

Le télégraphe Baudot, fondé sur ce principe, est une merveille de précision et de vitesse. Il permet d'envoyer 6 dépêches distinctes, par un même fil, dans le même temps qu'on mettrait à en imprimer une seule avec l'appareil Hughes ordinaire. L'organe essentiel est un *distributeur*, qui met, tour à tour et périodiquement, en communication avec le fil de ligne 6 manipulateurs Hughes : de cette façon, dans la première période on envoie la première lettre de 6 dépêches, puis, dans une seconde période, la deuxième lettre des 6 dépêches, et ainsi de suite, jusqu'à la dernière lettre des dépêches, chaque période dure le temps nécessaire à chaque employé pour préparer l'envoi d'une lettre, de sorte qu'il n'y a pas de temps de perdu dans le fonctionnement du fil de ligne. A la station d'arrivée, se trouve un autre *distributeur* qui fonctionne en sens inverse du premier, et distribue successivement à 6 récepteurs Hughes distincts une lettre de chacune des 6 dépêches différentes.

1096. **Systèmes duplex, diplex et quadruplex.** — Ces systèmes ne sont pas constitués par des appareils particuliers, comme les précédents, mais par des méthodes de transmission simultanée qu'on peut appliquer à tous les télégraphes.

Le *duplex* permet de *transmettre simultanément par un même fil deux dépêches en sens contraires.*

Le *diplex* permet de *transmettre par un même fil deux dépêches dans le même sens.*

Le *quadruplex* consiste en une combinaison des deux précédents, qui permet de *transmettre par un même fil quatre dépêches*, deux dans le même sens et deux en sens contraire. Ce dispositif est employé en Angleterre et en Amérique.

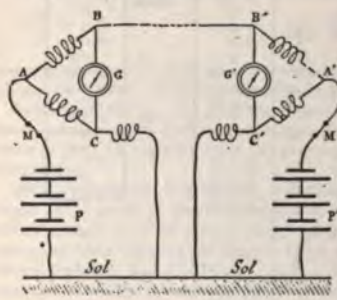


Fig. 988.

Description schématique d'un duplex. — Le principe de ce dispositif est de faire en sorte que le courant émis par la station de départ n'agisse pas sur le récepteur de cette station, qu'il traverse nécessairement pour aller à la ligne, mais seulement sur le récepteur de l'autre station. Les solutions de ce problème sont nombreuses ; voici l'une des plus curieuses, qui est une application du pont de Wheatstone (900).

A chaque station se trouve une pile P (fig. 988) dont un pôle est à la terre et dont l'autre communique au manipulateur M.

A partir du manipulateur le courant se bifurque en deux branches, AB, AC d'un côté, et A'B', A'C' de l'autre. Entre B et C d'une part et B' et C' d'autre part, on jette le pont sur lequel on place le galvanomètre. Enfin les branches AB et A' B' se retient au fil de ligne, tandis que les branches AC et A'C' vont à la terre. On peut, comme on le sait, proportionner les résistances en AB et en AC jusqu'à ce que l'intensité du courant soit nulle dans le pont. On reconnait qu'il en est ainsi lorsque l'aiguille du galvanomètre reste au zéro. A ce moment, on n'a plus qu'à remplacer le galvanomètre par le récepteur, et le duplex est monté.

1097. **Comparaison des divers télégraphes au point de vue de la rapidité de la transmission.** — On a consigné dans le tableau suivant, les nombres de dépêches (de 20 mots) envoyées à l'heure sur une ligne de 400 à 500 kilomètres.

Télégraphe Morse, monté en simple	25
Le même, — en duplex	45
Télégraphe Wheatstone, monté en simple	90
Le même, — en duplex	160
Télégraphes Hughes, — en simple	60
Le même, — en duplex	110
Télégraphe Baudot, à six claviers	240
Miroir simple	30
— en duplex	50
Siphon-recorder simple	30
— en duplex	50

TÉLÉGRAPHIE SOUS-MARINE.

1098. **Anomalies de la transmission sur les lignes sous-marines.** — La plupart des appareils en usage dans l'exploitation télégraphique des longues lignes sous-marines sont des appareils Morse ordinaires ou des systèmes employant les deux signaux du Code Morse. — Les *transmetteurs* de ces signaux sont, en principe, identiques à ceux qui sont employés dans le service des transmissions sur les lignes aériennes; mais les *récepteurs* doivent satisfaire à des conditions spéciales.

On doit prévoir des difficultés sérieuses dans l'emploi pour des transmissions électriques, de conducteurs établis comme le sont les longs câbles sous-marins dont la capacité est énorme, alors que leur résistance est elle-même assez grande.

Voici en effet ce que l'on observe à l'extrémité d'un câble reliant l'Irlande à l'Amérique, et ayant environ 3500 kilomètres de longueur, quand l'autre extrémité est mise en communication avec une source électrique : pendant 2/10 de seconde, rien; puis un courant excessivement faible, à peine perceptible, dont l'intensité croît progressivement, rapidement d'abord, puis plus lentement jusqu'à devenir uniforme après 3 secondes environ.

Quand la communication du câble avec la source électrique est interrompue, l'intensité du courant reçu décroît progressivement en suivant la même loi.

Ces constatations ont pu être faites au moyen d'un appareil de mesure extrêmement sensible imaginé par Sir W. Thomson, et dont les principales disposi-

tions ont été indiquées ci-dessus (983). C'est un *galvanomètre à miroir* qui fut le premier récepteur de la télégraphie sous-marine.

1099. **Galvanomètre ou récepteur à miroir** (*de Thomson*). — Il se compose d'une bobine formée par un grand nombre de tours de fil fin, dans l'intérieur de laquelle est suspendu, entre deux fils de cocon, un très petit miroir argenté sur le dos duquel est collé un aimant minuscule. Celui-ci est formé par un bout de ressort de montre ayant à peine quelques millimètres de longueur (fig. 989). A cheval sur la bobine, un aimant recourbé sert à diriger le petit aimant et son miroir, qui ensemble pèsent à peine 20 centigrammes. La source lumineuse est une lampe ordinaire dont le verre est remplacé par un tube

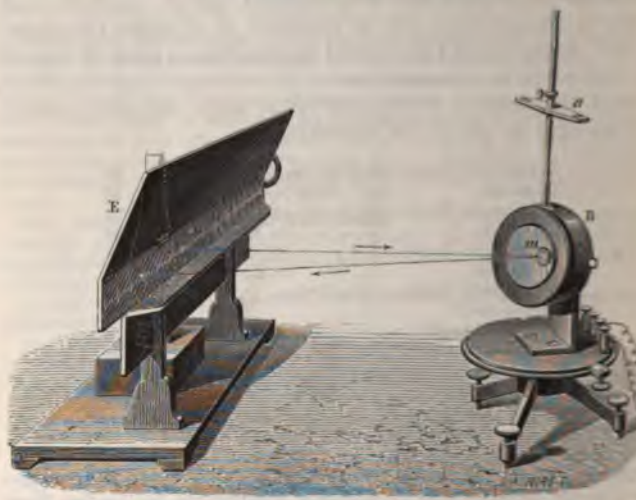


Fig. 989.

en métal noirci à l'extérieur et argenté à l'intérieur. — Une étroite ouverture pratiquée dans ce tube laisse passer un mince filet de lumière qui, après s'être réfléchi sur le miroir, va se projeter, sous la forme d'une ligne verticale blanche désignée sous le nom de *spott* (point), sur un écran en verre dépoli ou en papier huilé derrière lequel se tient l'employé chargé de la lecture des signaux.

Les mouvements plus ou moins rapides et les déplacements successifs du spott sont interprétés par cet employé, qui distingue ainsi les signaux du Code Morse effectués au moyen d'un manipulateur à deux leviers.

La lecture de ces signaux est assez difficile et exige une attention soutenue qui, à la longue, fatigue le lecteur. Dans l'obscurité, les yeux fixés sur son écran, celui-ci annonce à haute voix les lettres qu'il traduit au fur et à mesure de leur arrivée, et qui sont immédiatement inscrites par un secrétaire placé à proximité.

Le rendement d'un câble desservi par un miroir peut facilement atteindre 20 à 25 mots par minute avec des agents exercés.

1100. **Siphon-recorder de Thomson.** — En dehors de la fatigue qu'il impose au personnel appelé à le desservir, l'appareil à miroir présente les inconvénients des appareils à signaux fugitifs; aussi a-t-on considéré comme un progrès important l'invention par Sir W. Thomson du *siphon-recorder* (enregistreur), qui permet d'enregistrer sur une bande de papier les déviations de l'organe mobile de l'appareil récepteur, comme on pourrait le faire avec un dispositif photographique, mais dans des conditions beaucoup plus pratiques.

Le siphon-recorder comprend deux parties distinctes qu'il convient d'examiner séparément. — La première est le *système électromoteur*, et la seconde le *système enregistreur*.

1° *Système électromoteur.* — Le système électromoteur du siphon-recorder est le récepteur mentionné ci-dessus sous le nom de galvanomètre *à miroir*.

Il est réalisé sous la forme que fait comprendre la figure 990, I, II et III. Une bobine légère de forme rectangulaire *pp*, formée par un grand nombre de tours de fil fin, dont les extrémités aboutissent respectivement en *e* et *s*, est suspendue et maintenue par des brins de cocon II *f* entre les branches d'un aimant puissant NS, à une faible distance des pièces polaires. — Un bloc de fer X fixé sur la platine en cuivre K, à égale distance de ces deux pièces, a pour but de raccourcir les lignes de force magnétiques en les concentrant dans les deux espaces où doivent se mouvoir les deux longs côtés de la bobine. Les brins de cocon *f*, attachés à la partie inférieure de celle-ci, sont tendus vers le bas par de petites masses pesantes *m* que leur simple appui contre une paroi *z* un peu inclinée suffit à immobiliser. Entre ces deux brins de traction, la bobine porte une sorte d'index formé par une petite lame en aluminium *l*, destiné à accuser tous les mouvements qui lui seront imprimés autour de son axe vertical de suspension par les courants qui la traverseront.

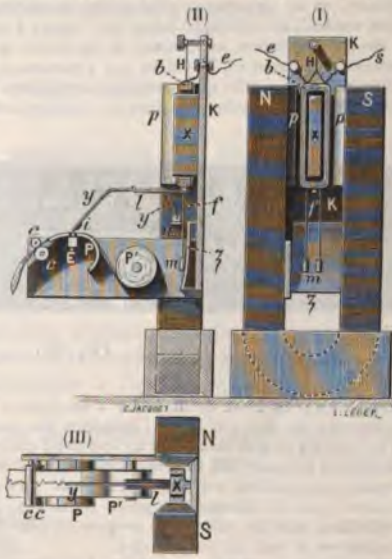


Fig. 990.

2° *Système enregistreur.* — Il s'agit maintenant d'enregistrer les mouvements exécutés par l'index *l*. Le dispositif représenté (fig. 990, I, II et III) fait voir un tube capillaire en verre *yy*, assujetti avec de la cire sur l'indice *l*, recourbé vers ses deux extrémités de façon à lui permettre de pénétrer par l'une, *y*, dans un petit vase *a* contenant de l'encre très fluide, et d'affleurer par l'autre la surface d'une bande de papier tendue sur un support-tambour PP'.

Quand il a été rempli d'encre une première fois, au moyen d'une aspiration *effectuée par son extrémité y*, le tube en verre constitue un siphon qui amènera *toute l'encre contenue dans le vase a* jusqu'à l'extrémité en contact avec le

papier, à la condition toutefois que celui-ci se déplace, car la capillarité du tube s'opposerait à un écoulement continu.

Cela étant bien compris, on peut facilement concevoir que les oscillations de la bobine, amplifiées par le tube-siphon, auront pour effet de tracer sur la bande de papier entraînée avec une vitesse uniforme par les cylindres CC sur le tambour P', une sinuzoïde ressemblant beaucoup à celle de la figure 991.

On éloigne un peu le papier de l'extrémité libre du tube filiforme rempli d'encre, et on imprime à celui-ci un mouvement vibratoire continu dans un plan vertical. Le ménisque formé par l'encre à cette extrémité, est ainsi amené à chaque oscillation, au contact de la feuille de papier qui, par suite de son avancement entre les cylindres qui l'entraînent, reçoit ainsi une trace pointillée analogue à celle que produisait le cracheur d'encre.

La vibration du tube est, dans ce système entretenue, par un procédé très

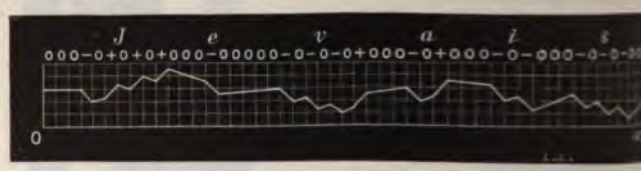


Fig. 991.

simple. Un petit bout de fil de fer *i* est collé le long et au-dessous de la partie inférieure du tube ; il subit l'influence du magnétisme développé au moyen d'un courant intermittent dans un très petit électro-aimant qui est fixé, comme le montre la figure 990 sous le pont-tablette P sur lequel glisse le papier. Le courant intermittent est emprunté à une pile spéciale et envoyé à l'électro-aimant E par un vibrateur du genre *trembleur*, réglé pour que ses oscillations coïncident avec les vibrations propres du tube-siphon dont l'élasticité joue ici, comme on le voit, un certain rôle.

Remarques. — 1° Afin de réduire l'amplitude des oscillations de la bobine sous l'action des courants venant du câble, et aussi pour soustraire celui-ci à l'action des courants telluriques, qui dans certains cas sont très-intenses, on ne met généralement pas le câble lui-même en contact direct avec la source électrique de la station de départ, non plus qu'avec le circuit de la bobine à la station d'arrivée.

2° C'est par l'intermédiaire d'un condensateur que le flux électrique se propage de la source au câble et de celui-ci à la bobine réceptrice.

3° Le genre d'appareil le plus généralement employé maintenant sur les longs câbles est le siphon-recorder, le galvanomètre à miroir n'étant plus utilisé qu'à titre tout à fait exceptionnel ; mais comme ses signaux sont assez difficiles à interpréter, on n'en fait usage que sur les lignes qu'on ne pourrait exploiter au moyen de l'appareil Morse ordinaire. C'est en effet le Morse ordinaire qui est utilisé sur les câbles ne dépassant pas 500 kilomètres ; mais il est des cas où l'emploi d'un relais particulier dit à zéro mobile s'impose, et alors on fait usage du système Brown et Allan.

La vitesse moyenne de la transmission sur les longs câbles n'est que de douze à quinze mots par minute.

CHAPITRE XVII

APPLICATIONS INDUSTRIELLES

—

TÉLÉPHONIE.

1101. **Définitions et classifications.** — Nous avons appelé *téléphonie* l'ensemble des procédés employés pour transmettre la parole à distance à l'aide de l'électricité.

Tout appareil téléphonique comprend deux organes *essentiels*, placés, l'un à la station de départ, l'autre à la station d'arrivée et reliés entre eux par une ligne à simple fil, ou plus ordinairement à double fil (aller et retour). Le premier organe s'appelle le *parleur* ou *transmetteur*; l'autre organe s'appelle le *récepteur*. Le *transmetteur* reçoit la parole de la bouche de la personne qui parle, et le *récepteur* la communique à l'oreille de la personne qui écoute.

Quoique le téléphone ne soit inventé que depuis 1876, il en existe déjà une infinité de systèmes; mais ils peuvent se ramener tous à deux types :

1° Les systèmes magnétiques;
2° Les systèmes avec pile.

Dans les premiers, le transmetteur et le récepteur sont deux téléphones; dans les autres, le transmetteur est complètement différent du récepteur et porte le nom de *microphone*. Ces derniers exigent l'emploi d'une pile auxiliaire qui n'existe pas dans les premiers.

1102. **Téléphone Bell.** — Le type des téléphones est celui qui a été inventé le premier, en 1876, par le professeur Graham Bell, de Philadelphie.

I. *Description.* — La figure 992 est une coupe longitudinale de cet appareil. L'enveloppe extérieure est un étui de bois, M, terminé à une extrémité par une petite boîte de même matière, munie d'une embouchure B. Dans la boîte est une bobine *b*, formée d'un noyau de fer doux sur lequel s'enroule un grand nombre de fois un fil fin de cuivre, recouvert de soie. Les deux bouts vont se relier à deux fils de cuivre plus gros *m* et *n*, recouverts de soie

et de gutta-percha, et sortant en torsade à l'autre bout, en P. Entre l'embouchure et la bobine est une plaque de fer doux s, très mince, très flexible et très rapprochée du noyau de la bobine, mais pas assez pour arriver en contact avec lui lorsqu'elle vibre. Enfin, sur l'autre face de la bobine est un barreau aimanté A, fixé par une vis à la pièce E, qui est elle-même maintenue par une petite plaque liée à un étui. Ce barreau aimante par influence le noyau de la bobine.

Cet organe étant pris pour *transmetteur* ou *parleur*, on se sert d'un appareil identique comme *récepteur* : on applique la bouche contre l'embouchure du premier et l'oreille contre celle du

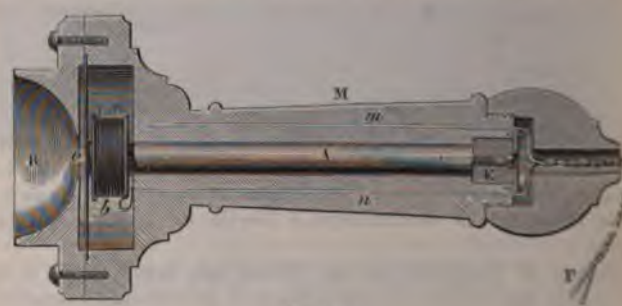


Fig. 992.

second. Les bobines des deux appareils sont reliées entre elles par les deux fils P.

II. *Fonctionnement et théorie.* — Lorsqu'on parle à haute voix dans l'embouchure, les ondulations de l'air se transmettent à la plaque de fer doux : celle-ci vibre à l'unisson de la voix, et, suivant l'amplitude de ses vibrations, s'approche plus ou moins du noyau de la bobine, en s'aimantant et se désaimantant par influence à chaque vibration. Ces variations de magnétisme produisent dans le fil de la bobine des courants induits qui se propagent dans le circuit fermé qui va du transmetteur au récepteur. Ces courants, d'autant plus intenses que l'amplitude et la vitesse des vibrations sont plus grandes, passent dans la bobine du récepteur en y reproduisant les variations de magnétisme qui les ont donné naissance, et ces variations de magnétisme elles-mêmes provoquent dans la plaque de fer doux du récepteur des oscillations semblables à celles du transmetteur : la deuxième plaque se met donc à vibrer à l'unisson de la première; ses vibrations se

transmettent à l'air, et si l'on applique l'oreille contre l'embouchure, on perçoit les sons émis à l'embouchure du transmetteur.

Ces sons seront d'ailleurs plus ou moins affaiblis, par suite d'une perte de force vive plus ou moins grande dans la transmission et la transformation du mouvement moléculaire.

III. *Objections à la théorie élémentaire.* — De nombreuses objections ont été faites à cette théorie élémentaire, qui fut admise tout d'abord à cause de sa simplicité.

M. Mercadier, à qui l'on doit une série de recherches expérimentales sur la téléphonie, a montré que l'on pouvait remplacer, dans un téléphone, la plaque de fer par de la limaille de fer disposée sur une feuille de carton : il ne saurait être ici question des vibrations d'ensemble de la plaque. Il a aussi construit des

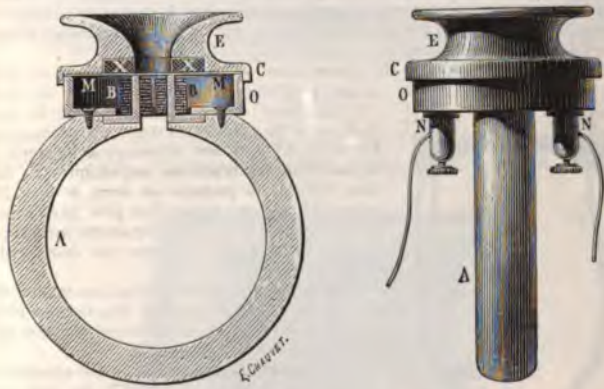


Fig. 993.

téléphones dans lesquels la plaque de fer était remplacée par une plaque d'aluminium ou de cuivre. Ce qui semble prouver que l'induction magnétique n'est pas la seule cause de production des courants.

En construisant des téléphones dont la plaque était incapable de vibrer sous l'action de la voix humaine (c'est-à-dire ayant un son fondamental supérieur à ut_5), il a constaté que la qualité de l'effet téléphonique était augmentée, c'est-à-dire que la voix était beaucoup moins altérée qu'avec les appareils ordinaires. Enfin, on a démontré que le son transmis ne cesse pas d'être perceptible, non seulement quand on supprime la plaque vibrante, *mais même lorsqu'on enlève le noyau aimanté*, à la condition toutefois que les spires du fil ne soient pas serrées.

Ainsi le phénomène est beaucoup plus complexe qu'il ne paraît au premier abord, et l'on doit attribuer les sons produits à des causes multiples :

1° *aux vibrations moléculaires* qui résultent, dans le noyau et dans la plaque, des aimantations et désaimantations successives dues aux courants induits venus *du transmetteur ;*

2° *aux vibrations d'ensemble* de la plaque o, lorsqu'elle est mince, de part et

d'autre de sa position d'équilibre (celles-ci, d'après M. Mercadier, sont nuisibles pour la qualité des effets, utiles pour leur intensité) ;

3° *aux vibrations moléculaires*, produites dans le fil de la bobine par les variations de ces courants induits.

IV. *Sensibilité du téléphone Bell.* — On peut se faire une idée de l'extrême sensibilité de cet appareil d'après la faiblesse du courant qui suffit pour l'impressionner. L'intensité du courant produit par un téléphone Bell, pour une vibration sonore correspondant au *la* normal, est égale à celle du courant que donnerait un seul élément Daniell dans un circuit télégraphique (fil de fer de 4 millimètres de diamètre) faisant 290 fois le tour de la Terre.

V. *Application de la sensibilité téléphonique.* — On a appliqué cette grande sensibilité de l'appareil à révéler l'existence de courants extrêmement faibles. Pour cela, on place un téléphone dans le circuit où passe ce courant faible, puis on coupe le circuit en un point quelconque et l'on en frotte les deux extrémités l'une contre l'autre : s'il y passe le moindre courant, on entend dans le téléphone des crachements qui correspondent à chaque ouverture et fermeture du circuit. Le téléphone peut servir, par exemple, à apprécier l'équilibre du pont de Wheatstone.

1103. **Autres téléphones.** — **Téléphone Ader.** — Le récepteur Ader est un téléphone magnétique analogue à celui de Bell.

Fig. 994.

Il est formé d'un aimant circulaire A, pouvant servir de poignée, et muni d'un anneau de fer doux XX qui sert d'armure à l'aimant et en *surexcite* les réactions magnétiques. La bobine induite est partagée en deux hélices BB, enroulées chacune autour d'un pôle de l'aimant. Le diaphragme vibrant est une plaque métallique placée en face et tout près des deux pôles (fig. 993).

Ce téléphone fonctionne ordinairement comme récepteur, mais il pourrait fonctionner aussi comme transmetteur, de la même manière que le téléphone ordinaire de Bell.

1104. **Bitéléphone Mercadier.** — Cet appareil se compose de deux téléphones TT (fig. 994) très légers, qui pèsent moins de 50 grammes et ont un diamètre de 3 centimètres. Ils sont réunis par un fil d'acier en forme de V qui fait ressort et permet de les maintenir sur oreilles sans le secours des mains : celles-ci étant rendues libres, on peut écrire tout en téléphonant. Des embouts *tt* amènent les ondes sonores jusque dans l'intérieur du conduit auditif. Les conducteurs sont en *rr*.

1105. **Microphone de Hughes.** — Si dans un circuit parcouru par un courant (fig. 995) on place un téléphone, et en même temps un cylindre de charbon qui soit très mobile sur ses contacts (également en charbon), les plus légères vibrations imprimées au charbon modifient assez la résistance des points de contact, et par suite l'intensité du courant, pour produire des effets téléphoniques.

Ce dispositif est réalisé par deux charbons de cornue *u* et *o*, montés parallèlement sur un même support, et munis chacun

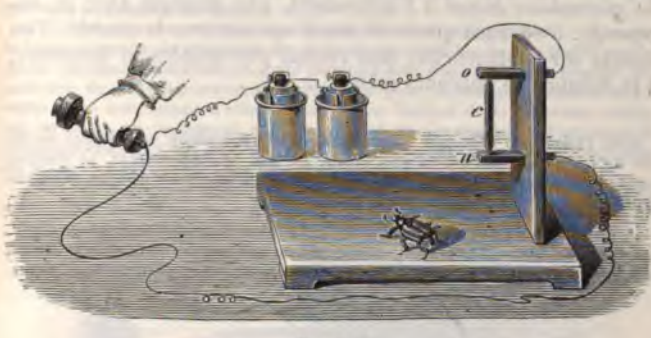


Fig. 995.

d'une cavité où s'engage un charbon *c* un peu gros, long de 4 centimètres environ, et libre assez pour pouvoir ballotter

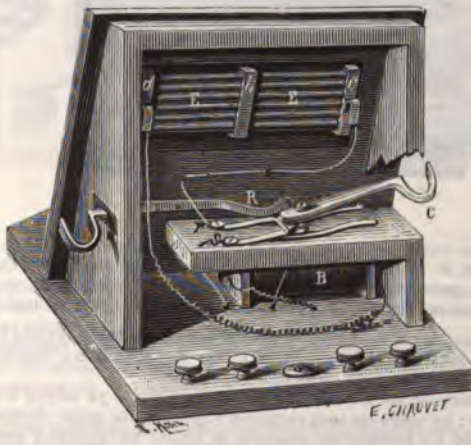


Fig. 996.

légèrement. Pour écarter les vibrations extérieures, on place sous la planchette horizontale des tubes de caoutchouc ou de l'ouate. *Le plus faible son produit* sur la planchette horizontale ébranle

le charbon *c*, fait varier l'intensité du courant et reproduit dans le téléphone un son qui est considérablement renforcé : de là le nom de *microphone* donné à l'instrument, par analogie avec le *microscope*. C'est ainsi que le tic-tac d'une montre, la marche d'un insecte sur la planchette, sont rendus perceptibles au téléphone à la distance de plusieurs mètres.

1106. Téléphones avec pile : Transmetteur microphonique. — *L'organe essentiel de ces téléphones est un microphone servant de transmetteur.* Le système varie donc suivant le microphone employé. Nous allons en décrire quelques types, des plus employés.

1° *Transmetteur Ader.* — Le transmetteur Ader est un *microphone multiple*, constitué par douze charbons, disposés comme une espèce de double grille E (fig. 996). Il est appliqué à la face inférieure d'une petite planchette en sapin,

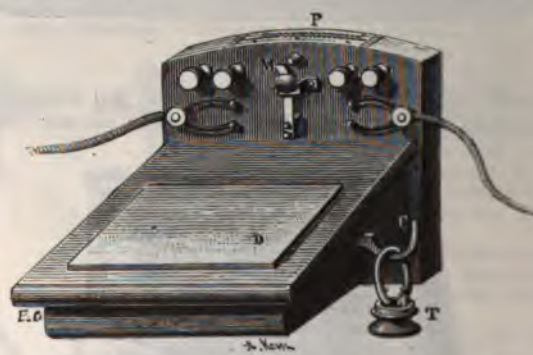


Fig. 997.

dont on voit le dessous (fig. 996) et le dessus D (fig. 997) qui a l'aspect d'un pupitre. On parle au-dessus de cette planchette, et les vibrations se communiquent alors au microphone, lequel fonctionne comme celui de Hughes.

2° *Transmetteur d'Arsonval.* — Lorsque les microphones doivent servir pour les grandes distances, il faut pouvoir régler la pression des charbons sur les appuis; car de là dépend la sensibilité de l'appareil.

Dans le microphone d'Arsonval (fig. 998) on y arrive au moyen d'un réglage magnétique : les charbons sont verticaux et portent une petite chemise C en fer doux (fig. 998, I); derrière les charbons se trouve un aimant A porté par un ressort R que l'on peut approcher ou éloigner à l'aide d'un simple bouton V; cet aimant, attirant les charbons, les applique plus ou moins sur les cavités qui leur servent d'appuis. Le microphone d'Arsonval porte généralement quatre charbons semblables (fig. 998) soumis à l'influence des deux pôles A et B d'un même aimant symétriquement disposé.

3° *Transmetteur Mercadier.* — Dans le microphone Mercadier les charbons

repose à sa partie inférieure, au moyen d'une enveloppe métallique, sur une pointe portée par une réglette mobile.

En avançant ou reculant celle-ci, on fait varier l'inclinaison du charbon, et par suite sa pression sur l'appui.

1107. **Perfectionnement d'Edison : Emploi de la bobine d'induction.** — Lorsque la ligne est courte, la résistance du microphone constitue la plus grande partie de la résistance du circuit, et toute variation dans cette résistance produit une variation de courant assez considérable. Mais pour les longues distances la résistance du microphone n'étant qu'une faible fraction de la résistance totale, ses variations ne produiront que des courants faibles incapables d'actionner le récepteur. Edison a fait faire un grand pas à la téléphonie en introduisant dans les microphones l'emploi de la bobine d'induction.

Le circuit microphonique comprend la pile, les charbons et le circuit primaire d'une bobine d'induction (dont la résistance est toujours très faible : 1 à

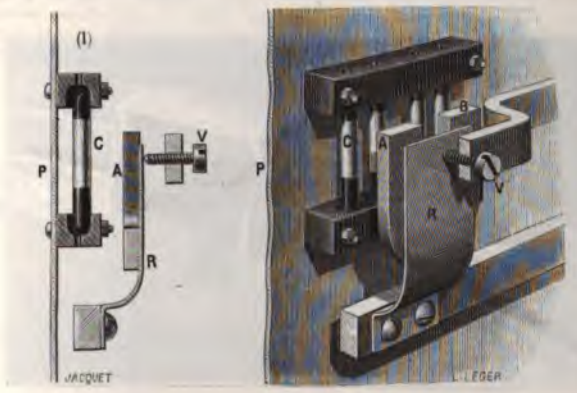


Fig. 998.

4 ohms). Le circuit secondaire de cette bobine (150 à 200 ohms) communique avec la ligne et les téléphones récepteurs.

Les variations d'intensité du courant primaire produisent dans le circuit secondaire des courants induits intenses qui se propagent à travers la ligne et vont dans les récepteurs.

1108. **Installation complète d'un poste téléphonique.** — Chaque poste doit comprendre un transmetteur microphonique avec sa pile locale, deux téléphones récepteurs et un système d'appel comportant une pile et une sonnerie.

Il faut pouvoir mettre en communication avec la ligne soit le système d'appel, soit le système téléphonique. Cela est réalisé au moyen d'un commutateur automatique à ressort C (fig. 996), qui est gouverné par l'un des crochets de support des téléphones (celui de gauche dans les appareils récents).

Lorsque l'appareil est au repos, le poids du téléphone agissant sur le crochet, le commutateur met la ligne en communication avec la sonnerie. En poussant un bouton M (fig. 997) on peut mettre à la place de la sonnerie la pile de ligne, *et envoyer ainsi un courant* d'appel dans la sonnerie du correspondant placé à

metteur, de deux *récepte*
relie l'appareil, non pas à
veut correspondre, on p
récepteurs en place. On
électro-aimant spécial (*an*

qui, tombant avec un bruit se
Un employé accroche alors
l'abonné, lui renvoie d'abord
lui, pour lui demander ses o

l'oreille gauche étant plus ou moins impressionnée, suivant que le chanteur se tenait à droite ou à gauche du souffleur.

3° *Théâtrophone.* — Les installations de cette nature ont été simplifiées et améliorées depuis. Ainsi ces auditions théâtrales peuvent être obtenues dans des appareils-récepteurs appelés *théâtrophones*, disposés dans les lieux publics. En laissant tomber une pièce de 50 centimes ou 1 franc, on établit automatiquement la communication électrique pendant 5 ou 10 minutes, et on produit une audition de même durée.

1110. Photophone de Graham Bell. — A la catégorie des téléphones à pile on peut rattacher le curieux appareil inventé par le professeur Bell, sous le nom de *photophone*.

1° L'organe essentiel du photophone est un *récepteur au sélénium*, analogue à un *parleur microphonique*.

Il se compose d'un petit cylindre de sélénium fondu, placé au foyer d'un réflecteur parabolique en cuivre argenté, et faisant partie du circuit d'une pile locale avec un téléphone de Bell (fig. 1000). Toutes les fois qu'un rayon lumineux, réfléchi par le miroir, vient frapper le sélénium, *sa résistance électrique*

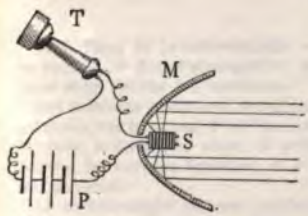


Fig. 1000.

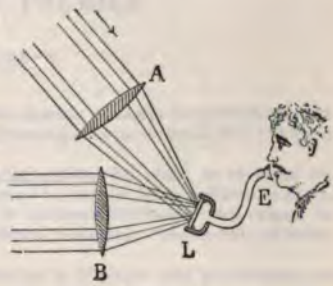


Fig. 1001.

est diminuée, et d'autant plus que le rayon incident est plus intense. Si donc on fait varier cette intensité d'une manière continue, la résistance du sélénium variera de même, et il en résultera, dans le téléphone, une suite de courants induits et des variations de magnétisme qui mettront la plaque en vibration.

Le *parleur* ou *transmetteur* se compose simplement d'une mince lame de verre ou de mica, argentée et formant miroir, fixée au fond d'une boîte téléphonique L. Sur ce miroir vient tomber, d'une manière permanente, un faisceau convergent de lumière électrique ou de lumière solaire (fig. 1001), qu après réflexion est renvoyé par une lentille B, parallèlement à l'axe, et vient alors tomber sur le miroir aplanétique M, qui le concentre sur le sélénium S, placé en son foyer. Tant que la plaque est en repos, le faisceau lumineux est transmis sans la moindre variation d'intensité ; dès qu'on parle dans l'embouchure E du transmetteur, les vibrations de la voix impriment au miroir plan des déplacements et des changements de forme qui produisent des variations correspondantes dans l'intensité du faisceau réfléchi, d'où résulte la reproduction des sons dans le téléphone T.

Cet appareil reproduit avec une grande netteté soit la parole articulée, soit les airs de musique ; mais la distance à laquelle il a pu jusqu'ici fonctionner est très faible, même quand on emploie la lumière solaire, à cause de la résistance

MÉTÉOROLOGIE

ET

CLIMATOLOGIE

CHAPITRE PREMIER

MÉTÉORES.

1111. Objet de la météorologie. — On nomme *météores* les phénomènes qui se produisent dans l'atmosphère, et *météorologie* la partie de la physique qui a pour objet l'étude des météores.

Les météores se divisent en : 1° *météores aériens* : les vents, les cyclones, les tornados, les trombes ; 2° *météores aqueux* : les nuages, les brouillards, la pluie, la rosée, le serein, la neige, la grêle ; 3° *météores électriques* : les orages, la foudre, les aurores boréales, et 4° *météores lumineux* : l'arc-en-ciel, les halos, les parhélies.

La météorologie est une application de la physique aux phénomènes de l'atmosphère. Elle a reçu d'importants développements depuis une trentaine d'années, et elle offre aujourd'hui au marin, à l'agriculteur, à l'hygiéniste, des applications d'un haut intérêt.

MÉTÉORES AÉRIENS.

1112. Vents, leur cause. — Les *vents* sont des courants aériens qui ont pour cause des différences de température, et par suite de densité, entre des régions de l'atmosphère plus ou moins distantes. L'air échauffé au contact du sol s'élevant par le même effet que les gaz de la combustion dans nos cheminées, il se produit une convection semblable à celle qu'on a vue se former dans les liquides chauffés par leur partie inférieure. De là des courants ascendants d'abord ; puis, se dilatant à mesure que la pression diminue, l'air se refroidit et cesse de s'élever. Les courants deviennent alors horizontaux et se dirigent, dans les hautes régions de l'atmosphère, des régions chaudes vers les régions froides : ce sont des *vents d'impulsion*. Au contraire, dans les basses régions, l'air chaud qui s'élève faisant appel comme dans le tirage des cheminées, des courants se produisent des parties froides vers les parties chaudes : ce sont les *vents d'aspiration*.

***1113. Direction et vitesse des vents.* — Anémomètres. — Rose des vents.** — *Les vents soufflent* dans toutes les directions ; on en a dénommé huit : le

nord, le *nord-est*, l'*est*, le *sud-est*, le *sud*, le *sud-ouest*, l'*ouest* et le *nord-ouest*. Les marins partagent en outre en 4 les intervalles entre ces 8 directions, ce qui fait en tout 32 directions, qu'on distingue respectivement sous le nom de *rumbs*. Le tracé de ces 32 rumbs sur un cercle, en forme d'étoile, est connu sous le nom de *rose des vents*.

La direction du vent se détermine à l'aide de girouettes; quant à sa vitesse, elle se mesure au moyen de l'*anémomètre*. On nomme ainsi un petit moulinet à ailettes que le vent fait tourner; du nombre de tours faits en un temps donné on déduit la vitesse. Dans nos climats, la vitesse moyenne est de 4 à 6 mètres par seconde. Avec une vitesse de 2 mètres, le vent est modéré; avec 10 mètres, il est frais; avec 20 mètres, il est fort; de 25 à 30 mètres, il y a tempête; et de 30 à 40 mètres, ouragan.

1114. **Vents réguliers ou alizés.** — On nomme *vents réguliers* ou *alizés* des vents qui soufflent toute l'année dans une direction constante. Ils s'observent loin des côtes, dans la zone torride, des deux côtés de l'équateur, jusqu'à 30 degrés de latitude : ils soufflent du nord-est au sud-ouest dans l'hémisphère boréal, et du sud-est au nord-ouest dans l'hémisphère austral.

Les vents alizés ont pour cause l'aspiration permanente qui se produit sous l'équateur par suite du fort échauffement de l'air à la surface des continents et des mers. Au-dessus de celles-ci l'air est en outre presque saturé de vapeur d'eau qui en diminue la densité. Par cette double cause, la pression est toujours moindre dans les régions équatoriales que dans les régions nord et sud, et de là résultent, dans chaque hémisphère, deux courants de sens contraires : l'un, d'air chaud, dirigé de l'équateur vers le pôle, et occupant les hautes régions de l'atmosphère; l'autre, d'air froid, dirigé du pôle vers l'équateur, et occupant les régions inférieures, à cause de sa plus grande densité. Si la terre était immobile, ces courants avanceraient en chaque point suivant un méridien; mais il n'en peut être ainsi, à cause de la rotation de la terre de l'occident vers l'orient. En effet, l'atmosphère participant à ce mouvement, à mesure que le courant parti du pôle avance vers le sud, il pénètre dans des couches d'air animées d'une vitesse de rotation plus grande que la sienne; il avance donc vers l'orient plus lentement que les couches qu'il traverse. Par suite, il s'infléchit vers l'ouest d'autant plus qu'il approche davantage de l'équateur, et de là un vent soufflant du nord-est. En résumé, le courant polaire souffle d'abord du nord, puis du nord-est, et enfin de l'est; telle est, dans les deux hémisphères, l'origine des vents alizés.

Dans les hautes régions de l'atmosphère, un phénomène semblable se produit, mais en sens contraire : le courant parti de l'équateur, en avançant vers le nord, va toujours, à cause de sa plus grande vitesse, en s'inclinant vers l'est, et tend à se transformer de plus en plus en vent d'ouest, de sud qu'il est d'abord; c'est l'*alizé supérieur*, ou *contre-alizé*.

Dans le cas où la terre ne tournerait pas sur son axe et où l'échauffement serait le même au nord et au sud de l'équateur, la figure 1091 montre la marche des alizés et des contre-alizés dans les deux hémisphères. N et S étant les deux pôles de la terre, OE l'équateur, T et T' les tropiques, la nappe ascendante se produit en C dans la région équatoriale, et, arrivée dans les hautes régions de l'atmosphère, elle se partage en deux nappes A, A', l'une vers le nord, l'autre vers le sud, lesquelles se rapprochent de la terre à mesure qu'elles se refroidissent : ce sont les contre-alizés. Puis, dans la partie inférieure de l'atmosphère, par suite de l'appel de la nappe ascendante C, il se produit deux nappes B, B', allant des zones tempérées vers l'équateur : ce sont les alizés proprement dits.

En C, le courant ascendant qui lie l'alizé au contre-alizé est bien déterminé et n'éprouve que de légers déplacements vers le nord ou vers le sud, suivant les saisons et suivant qu'il se forme au-dessus des mers ou au-dessus des conti-

nents. Le courant descendant qui, dans chaque hémisphère, relie l'alizé supérieur à l'alizé inférieur n'est pas aussi bien limité : après avoir dépassé le tropique, le contre-alizé ne se rabat pas en entier pour joindre l'alizé inférieur; une partie seulement revient vers l'équateur, tandis que l'autre continue à avancer vers le pôle jusqu'à une latitude assez élevée, comme le représentent les lignes ponctuées de la figure. Il existe donc, en réalité, dans chaque hémisphère, deux circuits, l'un entre l'équateur et le tropique, c'est le *circuit direct*; l'autre du tropique vers le cercle polaire, c'est le *circuit dérivé*. Le circuit direct atteignant une grande hauteur, ses deux vents restent superposés et ne se rencontrent pas; mais, le circuit dérivé étant peu élevé, ses deux vents marchent sensiblement de niveau dans deux lits qui se déplacent, tantôt juxtaposés, tantôt se rencontrant, et donnant alors naissance aux bourrasques et aux tempêtes des zones tempérées.

La figure 1002 représente la marche des circuits directs et dérivés dans l'hypothèse de l'immobilité de la terre autour de son axe. Dans ce cas, en effet,

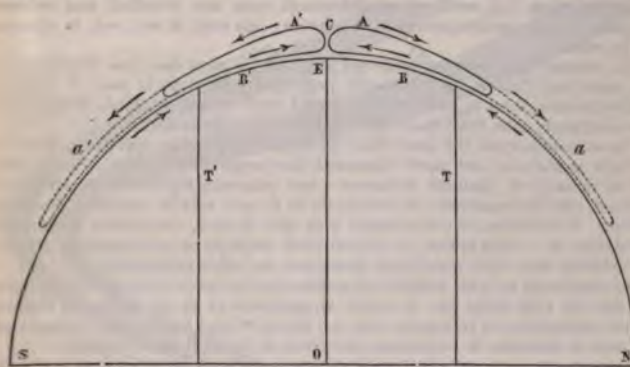


Fig. 1002.

les circuits seraient tout entiers dans un même plan; mais, comme on a vu plus haut que, par suite de la rotation de la terre, l'alizé avance vers l'ouest et le contre-alizé vers l'est, les deux alizés ne sont pas contenus dans un même plan, et la figure ci-dessus n'est que la projection de leurs circuits sur un même méridien. En outre, on a supposé la distribution de la chaleur symétriquement la même des deux côtés de l'équateur, et, dans ce cas, la nappe ascendante figurée en C serait exactement au-dessus de l'équateur. Mais l'hémisphère nord est plus chaud que l'hémisphère sud; d'où il résulte que cette nappe est déplacée vers le nord de l'équateur. Les circuits directs et dérivés subissant le même déplacement, les alizés A et B s'étendent au delà du tropique nord, tandis que les alizés A' et B' n'atteignent pas le tropique sud. En réalité, dans la figure ci-dessus, les différents circuits doivent donc être avancés un peu vers le nord.

1115. **Région des calmes.** — Les alizés des deux hémisphères, quoique convergents vers l'équateur, n'y donnent naissance qu'à un vent très léger. En effet, leur direction devenant alors verticale, leur résultante horizontale tend à devenir nulle; de là des calmes qu'on désigne sous le nom de calmes *équatoriaux*, calmes *troublés toutefois* par des orages presque quotidiens.

La région des calmes est variable : au nord de l'Afrique, au-dessus du Sahara, elle remonte de 20 degrés vers le nord; sur l'Atlantique elle atteint le 10e degré de latitude N. Sur le Pacifique, la région des calmes s'écarte peu de l'équateur. Ses déplacements sont plus grands en été qu'en hiver, et, en général, elle présente les mêmes sinuosités que les courbes des températures maxima.

Lorsque, à l'extrémité de leur parcours, les contre-alizés s'abaissent vers la terre, leur inclinaison dans le sens de la verticale produit un effet analogue à celui que produit la nappe ascendante à l'équateur, c'est-à-dire qu'on observe encore une région des calmes, mais moins bien caractérisée que la première : ce sont les *calmes tropicaux*.

Il y a donc lieu de considérer, à partir de l'équateur : 1° la région des calmes équatoriaux; 2° celle des alizés; 3° celle des calmes tropicaux; 4° enfin, la région des vents variables (1117).

1116. Vents périodiques, moussons, simoun, brise. — Les *vents périodiques* sont des vents qui soufflent régulièrement dans une direction aux mêmes saisons, ou aux mêmes heures de la journée; tels sont la mousson, le simoun et la brise.

On nomme *moussons* des vents qui soufflent six mois dans une direction et six mois dans l'autre. On les observe principalement dans la mer et dans le golfe d'Arabie, dans le golfe du Bengale et dans la mer de Chine. Dirigés vers les continents dans l'été, ils le sont en sens contraire dans l'hiver.

Les moussons d'été ont pour cause la haute température qu'atteint alors le versant méridional des monts Himalaya. Une nappe d'air chaud s'élève le long de ce versant, et, donnant naissance à une puissante aspiration des alizés du sud-est, elle les transforme en moussons, de la mer vers le continent. Pendant l'hiver, le continent se refroidissant plus que la mer, l'aspiration se produit au-dessus de l'océan Indien, et les moussons soufflent en sens contraire. Toutes les grandes chaînes de montagnes produisent des effets semblables.

Le *simoun* est un vent brûlant qui souffle des déserts de l'Asie et de l'Afrique, et qui est caractérisé par sa haute température et par les sables qu'il élève dans l'atmosphère et transporte avec lui. Quand ce vent souffle, l'air s'obscurcit, la peau se dessèche, la respiration s'accélère, et la soif devient ardente.

Ce vent est connu sous le nom de *sirocco* en Italie et en Algérie, où il souffle du grand désert du Sahara. Il porte le nom de *khamsin* en Égypte, où il se fait sentir depuis la fin d'avril jusqu'en juin. Pour se préserver des effets d'une transpiration cutanée trop rapide occasionnée par ce vent, les indigènes de l'Afrique s'enduisent le corps de graisse.

La *brise* est un vent qui souffle sur les côtes, de la mer vers la terre le jour, et de la terre vers la mer la nuit, c'est-à-dire de la région la plus froide vers la région la plus chaude. En effet, le sol s'échauffant plus que la mer pendant le jour, l'air, dilaté sur le continent plus que sur la mer, s'élève et est remplacé par un courant d'air plus dense, arrivant de la mer vers la terre. La nuit, le sol se refroidissant plus que l'eau de la mer par le rayonnement, le même phénomène se reproduit en sens contraire. La brise de mer commence après le lever du soleil, augmente jusqu'à trois heures de l'après-midi, décroît jusqu'au soir, et se change en brise de terre après le coucher du soleil. Les brises de mer et de terre ne se font sentir qu'à de faibles distances des côtes. Les brises sont régulières entre les tropiques, elles le sont moins dans nos contrées, et sont à peine sensibles sur les côtes du Groenland. Le voisinage des montagnes donne aussi naissance à des brises périodiques.

1117. Vents variables. — Les vents variables sont des vents qui soufflent tantôt dans une direction, tantôt dans une autre, sans qu'on puisse constater aucune loi qui préside à leur direction. Dans les latitudes moyennes, la direction des vents est très variable; en avançant vers les pôles, cette irrégularité

augmente, et sous la zone glaciale les vents soufflent parfois de plusieurs points de l'horizon. En approchant de la zone torride, ils deviennent de plus en plus réguliers. C'est le vent du sud-ouest qui domine dans le nord de la France, en Angleterre et en Allemagne : dans le midi de la France, la direction incline davantage vers le nord ; en Espagne et en Italie, c'est le vent du nord qui prédomine.

1118. **Cyclones.** — On nomme ainsi des masses considérables d'air animées d'un mouvement tournant très rapide autour d'un axe vertical. Ces météores prennent naissance dans la région des calmes équatoriaux, où ils ont toujours pour cause une inégalité de vitesse dans les alizés qui convergent des deux hémisphères l'un vers l'autre.

Les cyclones ne sont pas seulement animés d'un mouvement tournant, mais en outre d'un mouvement de translation, en vertu duquel ils s'avancent parfois

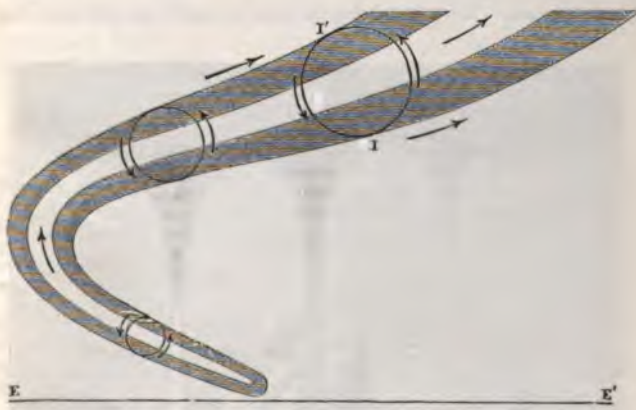


Fig. 1003.

jusqu'aux zones tempérées. La vitesse du mouvement de rotation atteint son maximum à une distance moyenne du centre du cyclone, et s'élève alors jusqu'à 250 kilomètres à l'heure. Celle de translation, qui croît avec la distance à l'équateur, est comprise dans les limites de 15 à 45 kilomètres à l'heure.

Dans l'hémisphère austral, la rotation s'opère toujours de l'ouest à l'est en passant par le nord. Dans notre hémisphère, la rotation est de sens contraire. Quant à la translation, elle a lieu d'abord, dans les deux hémisphères, de l'est à l'ouest ; puis elle s'infléchit vers l'est.

L'équateur étant représenté par la ligne EE', la figure 1003 montre la marche, et le développement d'un cyclone dans l'hémisphère boréal. Le diamètre initial, qui est primitivement de 250 à 400 kilomètres, croît progressivement et atteint, dans les latitudes élevées, jusqu'à 2000 kilomètres. Au centre se trouve une région relativement calme ; des deux régions latérales, celle en I, où les deux vitesses de rotation et de translation s'ajoutent, est le bord dangereux, tandis qu'en I', où les vitesses sont opposées, est le bord maniable. Dans tous les cas, les cyclones sont accompagnés d'une baisse considérable du baromètre,

surtout au centre, ce qui est un effet de la force centrifuge engendrée par le mouvement tournant.

Ces redoutables phénomènes, heureusement peu fréquents, s'observent surtout dans les mers de Chine et des Indes, où ils sont connus sous le nom de *typhons*, et aussi aux Antilles. Ils sont toujours signalés par d'épouvantables désastres sur mer et sur terre.

1119. Tornados. — Les *tornados* sont des rafales violentes qu'on ne rencontre que dans la région des calmes équatoriaux, où ils accompagnent en général les orages si fréquents dans cette zone. Comme les cyclones, ils sont animés d'un mouvement tournant dû à l'inégalité de vitesse des alizés. Ils s'annoncent par un petit nuage blanc qui apparaît à une grande hauteur. Ce nuage s'accroît, descend lentement, et en s'approchant de la terre s'entoure d'une nuée sombre, qui obscurcit bientôt toute l'atmosphère. Enfin, de la partie la plus noire, au milieu des éclats de la foudre, s'élance avec une extrême violence le tourbillon qui constitue le tornado.

1120. Trombes. — Les *trombes* sont des amas de vapeurs en suspension dans

Fig. 1004.

les couches inférieures de l'atmosphère, qu'elles traversent, animées le plus souvent d'un mouvement giratoire assez rapide pour déraciner les arbres, renverser les maisons, briser et détruire tout ce qu'elles rencontrent.

Ces météores, qui sont généralement accompagnés de grêle et de pluie, lancent souvent les éclairs et la foudre, en faisant entendre, sur toute la zone qu'ils parcourent, le bruit d'une charrette roulant sur un chemin rocailleux. Un grand nombre de trombes ne possèdent pas de mouvement giratoire, et le

quart environ de celles qu'on observe prennent naissance dans une atmosphère calme.

Les trombes se manifestent aussi bien sur les mers que sur les continents, et alors le phénomène présente un aspect remarquable. Les eaux s'agitent et s'élèvent en forme de cône, tandis que, les nuages s'abaissant eux-mêmes sous la forme d'un cône renversé, les deux cônes se réunissent par leurs sommets et forment une colonne continue de la mer aux nues (fig. 1004). Cependant, même en pleine mer, l'eau des trombes n'est jamais salée, ce qui prouve qu'elles sont surtout formées de vapeurs condensées, et non de l'eau de la mer élevée par aspiration.

Les trombes n'ont qu'une faible durée, leur parcours ayant peu de développement, quelques kilomètres seulement. Quant à leur étendue ou largeur, on en a observé dont le diamètre ne dépassait pas 200 mètres. Néanmoins elles acquièrent souvent une violence telle, qu'elles renversent les maisons, déracinent les plus gros arbres et les emportent à plus de 100 mètres.

Kæmtz admet qu'elles sont dues à deux vents opposés qui passent l'un à côté de l'autre, ou bien à un vent très vif qui règne dans les hautes régions de l'atmosphère. Peltier leur a attribué une origine électrique, opinion généralement admise aujourd'hui.

MÉTÉORES AQUEUX.

1121. Nuages. — Les *nuages* sont des amas de vapeurs condensées en gouttelettes d'une petitesse extrême, à une hauteur plus ou moins grande dans l'atmosphère. Ils résultent toujours de la condensation des vapeurs qui s'élèvent de la terre. D'après les apparences qu'ils présentent, on divise les nuages en quatre espèces principales, qui sont les *cirrus*, les *cumulus*, les *stratus* et les *nimbus*. Ces quatre sortes de nuages sont représentées dans la figure 1005, et désignées respectivement par 4, 3, 2 et 1 oiseau au vol.

Les *cirrus* sont de petits nuages blanchâtres, offrant l'aspect de filaments déliés, assez semblables à de la laine cardée. Ce sont les nuages les plus élevés, et, vu la basse température des régions qu'ils occupent, ils sont formés de particules glacées ou de flocons de neige. Leur apparition, quand ils deviennent épais, précède souvent un changement de temps.

Les *cumulus* sont des nuages arrondis, présentant l'aspect de montagnes entassées les unes sur les autres. Ils sont plus fréquents en été qu'en hiver, et, après s'être formés le matin, ils se dissipent généralement le soir. Si, au contraire, ils deviennent alors plus nombreux, et surtout s'ils sont surmontés de cirrus, on doit s'attendre à de la pluie ou à des orages.

Les *stratus* sont des couches nuageuses horizontales, occupant les basses régions de l'atmosphère, et paraissant très étroites par un effet de perspective. Ils se forment au coucher du soleil et disparaissent à son lever ; fréquents en automne, ils sont rares au printemps.

Enfin, les *nimbus*, ou nuages de pluie, sont des nuages qui n'affectent aucune forme caractéristique ; ils se distinguent seulement par une teinte d'un gris uniforme et par des bords frangés.

La hauteur des nuages est très variable ; en moyenne elle est de 1200 à 1400 mètres en hiver et de 3000 à 4000 en été. Mais elle est souvent beaucoup plus grande : Gay-Lussac dans son ascension aérostatique, en juillet, à une hauteur de 7016 mètres au-dessus du niveau de la mer, observa au-dessus de lui des cirrus qui paraissaient être à une hauteur considérable. M. d'Abbadie a observé en Éthiopie des nuages orageux dont la hauteur n'était que de 212 mètres au-dessus du sol.

Pour expliquer la suspension des nuages dans l'atmosphère, on a admis, d'après

Saussure, que les nuages et les brouillards sont formés de gouttelettes d'eau extrêmement petites, pleines et flottant dans l'atmosphère : elles y sont soutenues par les courants d'air chaud ascendants, de même que les poussières légères sont élevées par les vents; on sait aujourd'hui que les cumulus sont formés de globules pleins. Quant à l'immobilité que présentent les nuages dans le sens de la verticale, elle n'est qu'apparente. Le plus souvent les nuages tombent lentement; mais alors leur partie inférieure se dissipe continuellement dans les couches plus chaudes qu'elle traverse, tandis que leur partie supé-

Fig. 1005.

rieure s'accroît sans cesse par l'addition de nouvelles vapeurs qui se condensent : ce qui explique comment ils paraissent conserver une hauteur constante.

1122. Formation des nuages. — Plusieurs causes contribuent à la formation des nuages. 1° La basse température des hautes régions de l'atmosphère. En effet, il se dégage constamment de la terre et des eaux, sous l'influence du soleil, des vapeurs qui s'élèvent dans l'air en vertu de leur moindre densité; ces vapeurs, rencontrant des couches d'air de plus en plus froides, descendent bientôt à la température de saturation, et c'est alors qu'elles se condensant en gouttelettes infiniment petites, elles donnent naissance aux nuages.

2° Les courants d'air chaud et humide, qui s'élèvent pendant le jour dans l'atmosphère, subissant une pression de plus en plus faible, il en résulte une dilatation qui est une source de froid intense, et qui amène la condensation des vapeurs. C'est par cette raison que les hautes montagnes, arrêtant les courants aériens et les forçant à s'élever, sont une cause abondante de pluie.

3° Un courant d'air chaud et humide, qui se mélange avec un air plus froid, subit un refroidissement qui entraîne encore la condensation des vapeurs. C'est ainsi que les vents chauds et humides du sud et du sud-ouest, en se mélangeant à l'air plus froid de nos latitudes, donnent de la pluie. Les vents du nord et du nord-est, qui sont froids, tendent aussi, en se mélangeant à notre atmosphère, à en condenser les vapeurs; mais comme, par l'effet même de leur basse température, ces vents sont très secs, le mélange résultant atteint rarement la saturation, et généralement ils ne donnent pas de pluie.

1123. Pluie. — Pluviomètre. — La *pluie* est la chute, à l'état de gouttelettes, de l'eau provenant de la condensation, dans les hautes régions de l'atmosphère, des vapeurs qui s'élèvent du sol. Le plus souvent ce ne sont pas les nuages qu'on voit flotter dans l'air qui donnent la pluie; mais celle-ci se produit au moment même de la condensation des vapeurs, et les gouttelettes atteignent une grosseur d'autant plus forte qu'elles tombent d'une plus grande hauteur.

On mesure la quantité de pluie qui tombe annuellement dans un lieu au moyen du *pluviomètre* ou *udomètre*. C'est un vase cylindrique M (fig. 1006 et 1007), fermé à sa partie supérieure par un couvercle B, qui a la forme d'un entonnoir dans lequel tombe l'eau de pluie. Celle-ci pénètre ensuite dans le vase par un petit trou, de manière à être soustraite le plus possible à l'évaporation. De la partie inférieure part un tube de verre A dans lequel l'eau s'élève à la même hauteur qu'à l'intérieur, hauteur qu'on lit sur une grande échelle graduée en millimètres, placée sur le côté du tube. L'appareil étant placé dans un lieu découvert, si, au bout d'un mois, par exemple, la hauteur de l'eau dans le tube est de 0m,05, cela indique que dans le vase l'eau a atteint cette hauteur, et, par conséquent, que si l'eau tombée était étendue sur le sol, sans évaporation ni infiltration, il y en aurait une couche de 0m,05.

Fig. 1006.

Fig. 1007.

Un grand nombre de circonstances locales peuvent faire varier la quantité d'eau qui tombe dans divers pays; mais, toutes choses égales d'ailleurs, c'est dans les pays chauds qu'il doit pleuvoir davantage, car la vaporisation y est plus abondante. On observe en effet que la quantité de pluie croît des pôles à l'équateur. A Paris, la hauteur d'eau qui tombe annuellement est de 0m,564; à Bordeaux, de 0m,650; à Madère, de 0m,767; à la Havane, de 2m,32; à Saint-Domingue, de 2m,75.

La quantité de pluie varie avec les saisons. A Paris, en hiver, la hauteur d'eau qui tombe est de 0m,107; au printemps, de 0m,174; en été, de 0,161; en automne, de 0m,122. C'est donc en hiver qu'il tombe le moins d'eau.

1124. Brouillards. — Les *brouillards* sont des masses de vapeur d'eau qui, condensées dans l'atmosphère, en occupent les basses régions et en troublent la transparence. Ce sont de vrais nuages, qui se forment à la surface du sol par le refroidissement des couches inférieures de l'atmosphère. Les *brumes* sont des brouillards très épais.

1125. Rosée, serein, gelée blanche. — La *rosée* n'est autre chose que de la vapeur qui se condense et se dépose en gouttelettes sur les corps pendant la nuit. Ce phénomène est dû au refroidissement qu'éprouvent par l'effet du rayonnement nocturne les corps placés à la surface du sol. Leur température s'abaissant alors de plusieurs degrés au-dessous de celle de l'air, il arrive, surtout dans les saisons chaudes, que cette température devient inférieure à celle à laquelle l'atmosphère serait saturée. C'est alors que les couches d'air en contact avec les corps, et sensiblement à la même température qu'eux, laissent déposer une partie de la vapeur qu'elles contiennent : phénomène analogue à celui qui se produit quand dans une pièce chaude et humide on apporte une carafe d'eau fraîche : les vapeurs de l'air se condensent sur ses parois.

D'après cette théorie, qui est due au physicien anglais Wells, toutes les causes qui favorisent le refroidissement des corps doivent aussi augmenter le dépôt de rosée : c'est ce que l'expérience vérifie. Ces causes sont : le pouvoir émissif des corps, l'état du ciel et l'agitation de l'air. Les corps qui ont un grand pouvoir émissif, se refroidissant davantage, doivent condenser plus de vapeur. En effet, le dépôt de rosée est généralement nul sur les métaux, dont le pouvoir émissif est faible, surtout s'ils sont polis, tandis que la terre, le sable, le verre, les plantes, qui ont un grand pouvoir émissif, se recouvrent abondamment de rosée.

L'état du ciel a aussi une grande influence sur la rosée. S'il est sans nuages, les espaces planétaires, qui sont à une très basse température, n'envoient vers la terre qu'une quantité de chaleur inappréciable, et, le sol se refroidissant alors rapidement par le rayonnement nocturne, il y a un abondant dépôt de rosée. Mais s'il y a des nuages, ceux-ci, dont la température est beaucoup moins basse que celle des espaces planétaires, rayonnent vers le sol, et, par suite, les corps à la surface de la terre n'éprouvant plus qu'un faible refroidissement, le dépôt de rosée n'a pas lieu.

Le vent a aussi une influence sur la quantité de vapeur qui se dépose. S'il est faible, il l'augmente en renouvelant l'air; mais s'il est fort, il la diminue en échauffant les corps par son contact, et en ne laissant pas à l'air le temps de se refroidir. Enfin, le dépôt de rosée est d'autant plus abondant que l'air est plus humide, car il est plus près de son point de saturation.

Le *serein* est une précipitation d'eau en pluie très fine, sans qu'il y ait apparence de nuage. Ce phénomène se produit pendant les grandes chaleurs, dans les lieux humides, au coucher du soleil, quand les couches inférieures de l'air se refroidissent au-dessous du point de saturation.

La *gelée blanche* et le *givre* résultent, comme la rosée, des vapeurs contenues dans l'atmosphère, lorsque ces vapeurs se condensent sur des corps à une température au-dessous de zéro. La forme floconneuse que présentent les petits cristaux dont le givre est formé fait voir qu'ici les vapeurs se congèlent immédiatement sans passer par l'état liquide. Le givre se dépose, de même que la rosée, sur les corps qui rayonnent davantage, tels que les tiges et les feuilles des végétaux, et le dépôt se fait principalement sur les parties tournées vers le ciel.

1126. Neige, grésil, verglas. — La *neige* est de l'eau solidifiée en petits cristaux étoilés, diversement ramifiés et flottant dans l'atmosphère. Ces cristaux proviennent de la congélation des gouttelettes qui forment les nuages, lorsque leur température descend au-dessous de zéro. Ils sont d'autant plus réguliers qu'ils se sont formés dans un air plus calme. Pour les observer, on les reçoit sur un corps noir et on les regarde avec une forte loupe. La régularité et en même temps la variété de leurs formes sont vraiment admirables. La figure 1008 fait voir quelques-unes des formes que présentent les cristaux de neige, quand on les observe au microscope. Leurs variétés s'élèvent à plusieurs centaines.

Il neige d'autant plus dans un lieu qu'il est plus voisin des pôles ou plus élevé au-dessus du niveau des mers. Vers les pôles, la terre est constamment couverte de neige; il en est de même sur les hautes montagnes, où règnent des neiges perpétuelles, même sous l'équateur.

Fig. 1008.

Le *grésil*, qui est aussi de l'eau solidifiée, est formé de petites aiguilles de glace pressées les unes contre les autres d'une manière confuse. On attribue sa formation à la congélation brusque des gouttelettes des nuages dans un air agité.

Le *verglas* est une couche de glace unie et transparente qui se dépose sur le sol. La condition nécessaire pour sa formation est que, la température du sol étant au-dessous de zéro, après quelques jours d'un froid continu, il vienne à tomber un peu de pluie : celle-ci se congèle aussitôt ; mais s'il en tombe une plus grande quantité, le sol s'échauffe et le verglas ne se forme pas.

1127. Grêle. — La *grêle* est un amas de globules de glace compacts, plus ou moins volumineux, qui tombent de l'atmosphère. Dans nos climats, la grêle s'observe principalement pendant le printemps et l'été, et aux heures les plus chaudes de la journée; il en tombe fort rarement la nuit. La chute de la grêle est toujours précédée d'un bruissement particulier.

La grêle est généralement le précurseur des orages ; il est rare qu'elle les accompagne, plus rare qu'elle les suive. La grosseur des grêlons est très variable : elle atteint fréquemment celle d'une noisette. On en a observé de la grosseur d'un œuf de pigeon, du poids de 200 à 300 grammes. Aucune théorie n'explique d'une manière satisfaisante la formation des grêlons, et surtout comment ils peuvent atteindre un tel poids avant de tomber. Dans la théorie de Volta, les grêlons sont successivement attirés par deux nuages chargés d'électricités contraires ; mais si les grêlons étaient ainsi attirés, à plus forte raison les deux nuages le seraient l'un par l'autre et se confondraient.

Saussure admettait que les grêlons commencent à se former dans les hautes régions de l'atmosphère, et augmentent de volume en tombant. De la Rive pense que la grêle provient de gouttes d'eau refroidies au-dessous de zéro et se solidifiant *brusquement*. M. Dufour admet aussi que les grêlons sont *dus à la congélation brusque* de globules d'eau flottant dans la région de

nuages, et y ayant conservé l'état liquide à une température inférieure à zéro. Quelques globules venant à se solidifier, dès qu'ils heurtent d'autres globules encore liquides, ceux-ci se solidifiant instantanément, ainsi qu'on l'a vu en traitant de la surfusion, les nouveaux globules se soudent aux premiers, ce qui explique le volume qu'atteignent les grêlons.

MÉTÉORES ÉLECTRIQUES.

1128. Découverte de l'électricité de l'atmosphère par Franklin. — Dès que l'étincelle électrique fut connue, on la compara à la lueur de l'éclair, et le pétillement qui l'accompagne au bruit du tonnerre ; mais c'est Franklin qui le premier, à l'aide des batteries électriques, établit un parallèle complet entre la foudre et l'électricité, et indiqua dans un mémoire publié en 1749 les expériences à faire pour soutirer aux nuages orageux leur électricité au moyen de pointes métalliques.

Expérience de Dalibard. — Guidé par les idées théoriques de Franklin, Dalibard, physicien français, dressa dans un jardin, à Marly, près de Paris, une barre de fer isolée, de 33 mètres de hauteur, laquelle, sous l'influence d'un nuage orageux, donna, le 19 mai 1752, des étincelles assez fortes pour charger plusieurs bouteilles de Leyde.

Expériences de Franklin. — Cependant Franklin, de son côté, se disposait à faire l'expérience qu'il avait annoncée; il attendait pour cela qu'un clocher qui était en construction fût terminé, lorsqu'il eut la pensée de faire usage d'un cerf-volant muni d'une pointe métallique, qui pouvait atteindre à de plus hautes régions dans l'atmosphère. En juin 1752, par un temps d'orage, et avant de connaître l'expérience de Dalibard, il se rendit dans un champ, près de Philadelphie, en compagnie de son jeune fils. Là, ayant lancé le cerf-volant, il attacha une clef à la corde, et à la clef un cordon de soie destiné à isoler l'appareil ; puis il fixa le cordon de soie à un arbre. Ayant présenté la main à la clef, il ne recueillit d'abord aucune étincelle, et il commençait à désespérer du succès, quand, une légère pluie étant survenue, la corde devint bon conducteur, et la clef donna l'étincelle désirée. L'émotion du célèbre physicien fut si vive, ainsi qu'il le raconte lui-même dans ses lettres, qu'il ne put retenir ses larmes.

Franklin, qui avait découvert le pouvoir des pointes, mais qui en ignorait la théorie, admettait que le cerf-volant soutirait au nuage son électricité ; mais, d'après la théorie de l'électrisation par influence, le phénomène doit s'expliquer par l'influence que le nuage orageux exerçait sur le cerf-volant et sur la corde.

1129. Appareils pour apprécier l'électricité de l'atmosphère. — Les premiers appareils dont on ait fait usage pour reconnaître la présence de l'électricité dans l'atmosphère sont : l'électromètre à boules de sureau, à pailles ou à feuilles d'or, l'appareil de Dalibard, des flèches lancées dans l'atmosphère, et même des cerfs-volants ou des ballons captifs.

Les appareils dont on se sert actuellement sont :

1° L'électromètre de Saussure ;

2° Le collecteur d'électricité de Thomson ;

3° L'électromètre bifilaire de Palmieri.

1130. Électromètre de Saussure. — Pour observer l'électricité pendant un temps serein, où la tension est généralement faible, on emploie de préférence l'électromètre que Saussure avait appliqué à ce genre de recherches. C'est un électromètre semblable à celui déjà décrit, mais dont la tige qui porte les feuilles d'or ou les pailles est surmontée d'un conducteur de 40 centimètres de hauteur, terminé en boule ou en pointe (fig. 1089). Pour préserver l'appareil de

la pluie, on le couvre d'un chapeau métallique d'un décimètre de diamètre. La cage de verre, qui est carrée, n'a que 5 centimètres de côté, et un cadran divisé, appliqué sur sa face intérieure, indique l'angle d'écart des feuilles d'or ou des pailles. Cet électromètre ne donne des signes d'électricité atmosphérique qu'autant qu'on l'élève dans l'atmosphère, de façon qu'il se trouve dans des courants d'air dont l'état électrique soit supérieur au sien. Une élévation de 3 décimètres suffit pour obtenir une divergence de 20 degrés par suite de l'excès d'électricité. D'après Saussure, jusqu'à 25 degrés, les déviations sont proportionnelles aux charges électriques.

1131. Collecteur de l'électricité atmosphérique de Thomson. — En traitant des appareils qui servent à constater

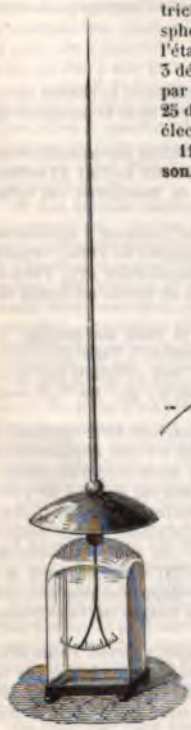


Fig. 1009.

Fig. 1010.

la présence de l'électricité dans l'atmosphère, tels que les électromètres de Saussure, de Palmieri, de Pelletier, les flèches de Becquerel, on a vu que tous ne donnent des signes d'électricité qu'à la condition qu'on les élève dans l'atmosphère. On arrive au même résultat, avec le *collecteur d'électricité* de Thomson, par l'écoulement d'un filet d'eau.

Cet appareil consiste en un vase métallique A de 60 litres de capacité, isolé sur trois tubes de verre pleins, ou d'ébonite, fixés au sommet d'une colonne de fonte creuse de deux mètres de hauteur (fig. 1010). Le tout est établi à l'extérieur, dans un lieu découvert, et un chapeau de tôle B garantit les tubes de la pluie. Le vase A se remplit d'eau par un tube latéral C en communication avec un réservoir plus élevé; on fait ensuite écouler l'eau du vase par une tubulure à robinet fixée à sa base.

Soit V le potentiel de l'air dans le voisinage immédiat de l'orifice de cette tubulure. Si le potentiel de l'eau contenue en A est différent et égal par exemple à V', il en résultera une force électrique normale à la surface de l'eau qui s'écoule et dont le signe dépendra du signe de $V - V'$; si l'on a $V' < V$, la force sera dirigée à l'intérieur de l'eau; par suite la densité électrique à la surface de l'eau sera donnée par la formule de Coulomb

$$F = -4\pi\mu.$$

Chaque gouttelette entraînant ainsi de l'électricité négative, la charge positive de l'eau augmente en A d'une façon continue et par suite le potentiel de cette eau jusqu'au moment où l'on a $V' = V$.

Il résulte de là que l'électromètre qui est en communication permanente avec le vase A mesurant le potentiel de ce vase mesure aussi celui de l'air à l'orifice d'écoulement. L'électromètre employé à l'Observatoire de Montsouris est celui de M. Branly, que nous avons décrit précédemment.

1152. **Électromètre bifilaire de Palmieri.** — Enfin, pour observer l'électricité de l'atmosphère et mesurer sa tension, M. Palmieri, directeur de l'Observatoire du Vésuve, a adopté un électromètre bifilaire en communication avec l'atmosphère par un long conducteur mobile, qu'on élève plus ou moins au-dessus du lieu de l'observation

1153. **Distribution de l'électricité dans l'atmosphère et dans les nuages.** — Après des observations continuées pendant plusieurs années, à l'aide de l'électromètre à conducteur mobile, M. Palmieri est arrivé aux résultats suivants, qui diffèrent en plusieurs points de ceux admis jusqu'ici par les météorologistes.

1° Par un ciel serein comme par un ciel nuageux, l'électricité de l'atmosphère est toujours positive, pourvu qu'à une certaine distance du lieu d'observation il ne tombe ni pluie, ni grêle, ni neige. Cette distance varie avec l'abondance de la pluie, de la neige ou de la grêle, et son maximum est de 50 à 60 kilomètres. D'après M. Palmieri, si l'on observe de l'électricité négative dans l'atmosphère par un ciel nuageux, il ne faut point l'attribuer à des nuages négatifs, mais à ce qu'il pleut, neige ou grêle dans les contrées voisines. Pendant vingt années d'observations, à une altitude de 637 mètres, quand des nuages passaient sur l'Observatoire du Vésuve et l'enveloppaient pendant des journées entières, on a constamment observé dans ces nuages de l'électricité positive.

2° L'électricité de l'atmosphère augmente à mesure que s'accroît l'humidité relative, et atteint son maximum à la chute de la pluie, de la neige ou de la grêle, non seulement sur le lieu de l'observation, mais jusqu'à la distance de 60 kilomètres; et c'est alors seulement qu'on peut tirer des étincelles des conducteurs isolés et bien exposés.

3° Les nuages seuls n'ont pas par eux-mêmes une tension propre par rapport au milieu ambiant; et dans les nuages, ou à une petite distance de ceux-ci, on n'observe de tensions assez fortes que pendant que les vapeurs se condensent en nuages pour porter la pluie à quelque distance du lieu d'observation. En effet, on n'obtient jamais de décharge lumineuse sans qu'il y ait chute de pluie, de neige ou de grêle dans le lieu où se font les observations, ou à une certaine distance.

4° La loi suivant laquelle se manifeste l'électricité pendant les pluies tranquilles ou orageuses peut s'énoncer ainsi : *Partout où tombe la pluie, il existe une forte manifestation d'électricité positive, entourée d'une zone d'électricité négative, suivie elle-même d'une autre zone d'électricité positive*, la limite entre deux zones étant à la tension zéro. Par suite, on peut observer de fortes tensions positives ou négatives, suivant la position qu'on occupe par rapport à la pluie; et on passe d'une phase à l'autre, si la pluie commence à tomber

à une certaine distance, s'approche du lieu de l'observation, y tombe et s'en éloigne ensuite. D'où M. Palmieri conclut que les nuages ne sont point des conducteurs électrisés, mais développent de l'électricité positive pendant qu'ils se résolvent en pluie; en sorte que c'est leur forte tension positive qui, par influence, excite, à l'entour, de l'électricité négative. En un mot, les nuages possédant une électricité négative propre n'existent pas, et s'il arrive parfois d'avoir de l'électricité négative pendant la pluie sur le lieu de l'observation, elle est due à une autre pluie beaucoup plus forte qui tombe à distance.

5° Enfin, M. Palmieri a démontré directement par des expériences de cabinet que les vapeurs aqueuses, en se condensant, développent de l'électricité positive; d'où il conclut que *c'est à la condensation des vapeurs dans les hautes régions de l'atmosphère qu'il faut attribuer l'électricité des nuages*, et que c'est par suite d'une condensation continue qu'un même nuage peut donner plusieurs foudres.

6° Les travaux récents de M. Thomson et ceux de MM. Mascart et Joubert montrent que, par un ciel sans nuages, le potentiel électrique de l'air croît proportionnellement à la hauteur à laquelle on s'élève. M. Thomson a trouvé à Aberdeen, sur une plage au bord de la mer, une variation de 100 volts par mètre. MM. Mascart et Joubert ont observé une variation de 300 volts, soit *une unité électrostatique*, par mètre. Si cette augmentation de potentiel était due à une charge répandue sur le sol, il faudrait que celle-ci fût négative et égale à 10^{-13} coulombs par centimètre carré, ce qui correspondrait à une tension électrique très faible, égale seulement à un demi-millionième de dyne.

7° *Origine de l'électricité atmosphérique.* — On a cherché à la rattacher soit au phénomène d'évaporation : la vapeur d'eau emporterait de l'électricité positive empruntée au sol, qui resterait alors chargé négativement, soit à des courants induits par la rotation terrestre dans les couches supérieures de l'atmosphère considérées comme conductrices. Les aurores boréales s'expliqueraient par cette même hypothèse.

1154. Éclair. — L'*éclair* est une lumière éblouissante projetée par l'étincelle électrique qui éclate des nuages chargés d'électricité. La lumière des éclairs est blanche dans les basses régions de l'atmosphère; mais dans les hautes régions, où l'air est plus raréfié, elle prend une teinte violacée, comme le fait en pareil cas l'étincelle de la machine électrique.

Les éclairs ont quelquefois plusieurs lieues de longueur. Leur passage dans l'air s'opère le plus souvent en zigzag. On attribue ce phénomène à la résistance que présente l'air comprimé par le passage d'une forte décharge. L'étincelle dévie alors de la ligne droite pour prendre la direction suivant laquelle la résistance est moindre. Dans le vide, en effet, la transmission électrique ne se fait plus en zigzag.

On distingue trois sortes d'éclairs : 1° Les *éclairs en zigzag*, qui se meuvent avec une vitesse extrême, sous la forme d'un trait de feu à contours parfaitement déterminés, et qui sont tout à fait comparables à l'étincelle des machines électriques [1]. 2° Les *éclairs qui*, au lieu d'être linéaires comme les précédents, *embrassent tout l'horizon*, sans présenter aucun contour apparent, comme le ferait l'éclat subit d'une explosion de matières inflammables. Ces éclairs, qui sont les plus fréquents, paraissent se produire au sein même de la nue et en éclairer la masse. 3° Les *éclairs en boule ;* ces éclairs, qui sont quelquefois visibles pendant plus de dix secondes, descendent des nuages sur la terre avec assez de lenteur pour que l'œil puisse les suivre. Ces globes rebondissent souvent à la surface du sol ; d'autres fois ils se divisent et éclatent avec un bruit comparable à la détonation de plusieurs pièces de canon. On a remar-

1. *L'éclair en zigzag n'est qu'une apparence dont la photographie instantanée n'a pas confirmé la réalité.* La figure 527 montre la véritable forme des éclairs.

qué que c'est, en général, sous cette forme que se présente la foudre lorsqu'elle pénètre dans l'intérieur des édifices. L'origine de ces éclairs n'est pas connue.

Quant aux éclairs dits *éclairs de chaleur*, parce qu'ils brillent dans les nuits d'été sans qu'on aperçoive aucun nuage au-dessus de l'horizon, et sans qu'on entende aucun bruit, ils ne sont autres que des éclairs ordinaires qui éclatent dans les nues situées au-dessous de l'horizon, à des distances telles, que le roulement du tonnerre ne peut arriver jusqu'à l'oreille de l'observateur.

Durée. — La durée des éclairs n'est pas d'un millième de seconde, ce qui a été constaté par Wheatstone, au moyen d'une roue qu'on fait tourner assez vite pour que les rayons en soient invisibles; mais, si on les éclaire avec la lumière d'un éclair, la durée de celui-ci est si courte, que, quelle que soit la vitesse de rotation de la roue, elle apparaît complètement immobile, c'est-à-dire que son déplacement n'est pas sensible pendant la durée de l'éclair.

1135. **Bruit du tonnerre.** — Le *tonnerre* est la détonation violente qui succède à l'éclair dans les nuées orageuses. L'éclair et la détonation sont toujours simultanés; mais on observe un intervalle de plusieurs secondes entre ces deux phénomènes, ce qui provient de ce que le son ne parcourt qu'environ 337 mètres par seconde, tandis que la lumière n'emploie qu'un intervalle inappréciable pour se propager de la nue à l'œil de l'observateur. Par suite, celui-ci n'entend le bruit du tonnerre que cinq ou dix secondes après avoir vu l'éclair, suivant qu'il est distant du nuage orageux de cinq ou dix fois 337 mètres.

Le bruit du tonnerre résulte de l'ébranlement qu'excite dans la nue et dans l'air la décharge électrique, ébranlement que rend sensible l'expérience du thermomètre de Kinnersley. Près du lieu où éclate l'éclair, le bruit du tonnerre est sec et de courte durée. Plus loin, on entend une série de bruits qui se succèdent rapidement. A une plus grande distance encore, le bruit, faible au commencement, se change en un roulement prolongé, d'intensité très inégale.

Explication. — On a proposé de nombreuses hypothèses pour expliquer le roulement du tonnerre; mais aucune ne satisfait complètement. Les uns l'ont attribué à la réflexion du son sur la terre et sur les nuages; d'autres ont considéré l'éclair non pas comme une seule étincelle, mais comme une suite d'étincelles élémentaires qui donnent lieu chacune à une détonation particulière. Ces détonations partielles partant de points diversement éloignés et de zones d'inégale densité, il en résulte que non seulement elles arrivent à l'oreille de l'observateur successivement, mais qu'elles y apportent des sons d'inégale intensité, ce qui occasionne la durée et l'inégalité du roulement.

Le maximum de durée du roulement observé à Paris est de 35 à 45 secondes. Dans les montagnes, cette durée est plus grande.

1136. **Effets de la foudre.** — La *foudre* est la décharge électrique qui s'opère entre un nuage orageux et le sol. Celui-ci, sous l'influence de l'électricité du nuage, se charge d'électricité contraire, et lorsque l'effort que font les deux électricités pour se réunir l'emporte sur la résistance de l'air, l'étincelle éclate: ce qu'on exprime, dans le langage ordinaire, en disant que la foudre *tombe*; mais il ne faudrait pas entendre par là que la foudre se dirige de préférence de haut en bas. Comme les étincelles artificielles, elle tend à frapper dans tous les sens, se dirigeant toujours vers les objets les plus voisins et les mieux en rapport avec le sol. Du reste, on observe aussi des phénomènes de *foudre ascendante*, qui se produisent probablement lorsque, les nuages étant électrisés négativement, la terre l'est positivement; car toutes les expériences montrent qu'à la pression ordinaire le fluide positif traverse plus facilement l'atmosphère que le fluide négatif.

D'après la première loi des attractions électriques, la foudre doit tomber sur

les objets les plus rapprochés de la nue et les meilleurs conducteurs. On observe, en effet, que ce sont les arbres, les édifices élevés, les métaux, qui sont plus particulièrement frappés par la foudre. C'est pourquoi il est imprudent de se placer sous les arbres en temps d'orage, surtout si ces arbres sont bons conducteurs, comme les chênes, les ormes. Mais le danger n'est plus le même sous les arbres résineux, comme les pins, parce qu'ils conduisent mal l'électricité.

Les effets de la foudre sont très variés et de même nature que ceux des batteries, mais avec une intensité bien plus considérable. La foudre tue les hommes et les animaux, enflamme les matières combustibles, fond les métaux, brise en éclats les corps peu conducteurs.

Fulgurites. — En pénétrant dans le sol, la foudre fond les matières siliceuses qui se trouvent sur son passage, et il se produit ainsi, dans la direction de la décharge, des tubes vitrifiés (fig. 1011), qu'on a nommés *tubes fulminaires* ou *fulgurites*, qui ont jusqu'à 10 mètres de long.

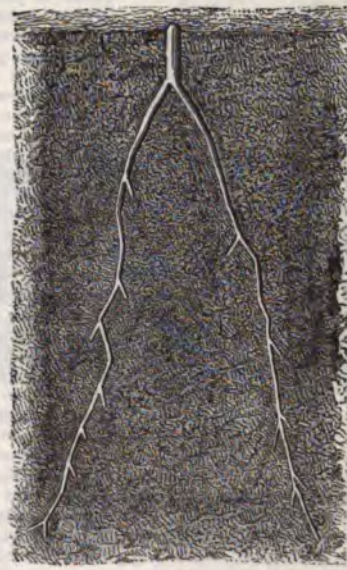


Fig. 1011.

Enfin, en tombant sur les barres de fer, elle les aimante, et renverse souvent les pôles des aiguilles des boussoles.

La foudre répand, en général, sur son passage une odeur qu'on a comparée à celle du soufre enflammé ou d'une matière phosphoreuse. Cette odeur a été attribuée à un composé oxygéné formé sous l'influence de la décharge électrique, auquel on a donné le nom d'*ozone*. Schœnbein, en 1840, puis Marignac et De la Rive, et enfin MM. Edmond Becquerel et Fremy ont démontré que l'ozone n'est autre chose que l'oxygène électrisé.

1137. Paratonnerre. — Un *paratonnerre* est une tige de fer destinée à présenter un écoulement facile à l'électricité du sol, attirée par l'électricité contraire des nuages orageux. L'invention des paratonnerres est due à Franklin en 1755.

Description. — On distingue dans un paratonnerre deux parties : la *tige* et le *conducteur*. La *tige* est une barre de fer rectiligne, qu'on fixe verticalement au faîte des édifices qu'il s'agit de préserver ; elle a de 6 à 9 mètres de hauteur, et sa section, à sa base, est un carré de 5 à 6 centimètres de côté. Elle se termine par une pointe, qui doit être en *métal inaltérable* : on a choisi en dernier lieu le cuivre doré. Il ne faut pas faire la pointe trop aiguë, parce qu'elle pourrait être fondue par la foudre. Ordinairement on *visse*, puis on soude à l'extrémité supérieure de la tige de fer un cylindre de cuivre de 17 centimètres de hauteur et de 2 centimètres de diamètre, terminé par un cône de 3 centimètres de hauteur (fig. 1012). Le *conducteur* est une barre de fer qui descend du pied de

la tige jusqu'au sol, dans lequel elle pénètre profondément. Des barres de fer ne pouvant facilement, à cause de leur rigidité, suivre les contours des édifices, il est préférable de former le conducteur de cordes de fil de fer, comme celles qu'on emploie dans les ponts suspendus. L'Académie des sciences a publié, il y a quelques années, un rapport sur les paratonnerres, dans lequel elle recommande d'employer plutôt des fils de cuivre rouge que des fils de fer dans la fabrication des cordes destinées à servir de conducteurs, le cuivre rouge conduisant mieux l'électricité que le fer. Ces cordes doivent avoir 1 centimètre carré de section métallique, et les fils 1 millimètre à 1mm,5 de diamètre; elles peuvent être cordées à trois torons, comme les cordes ordinaires. Le même rapport conseille de terminer la tige des paratonnerres par une pointe de cuivre rouge plutôt que par une pointe de platine, toujours à cause de la plus grande conductibilité.

Fig. 1012.

Le conducteur se rend ordinairement dans un puits, et, pour mieux établir la communication avec le sol, on le termine par deux ou trois ramifications. Si l'on n'a pas de puits à proximité, on pratique dans le sol un trou de 4 à 6 mètres de profondeur, et, après y avoir introduit le pied du conducteur, on achève de remplir le trou avec de la braise de boulanger, qui conduit bien.

Théorie. — La théorie élémentaire des paratonnerres est fondée sur l'électrisation par influence et sur le pouvoir des pointes. Franklin admettait que les pointes de paratonnerre *soutirent* aux nuages orageux leur électricité; c'est le contraire qui a lieu. Lorsqu'un nuage orageux, électrisé positivement par exemple, se forme dans l'atmosphère, il agit par influence sur la terre, repousse au loin l'électricité positive et attire l'électricité négative, qui s'accumule sur les corps placés à la surface du sol, d'autant plus abondamment que ces corps atteignent une plus grande hauteur. Les plus hauts sont alors ceux qui possèdent la plus forte tension, et qui, par conséquent, sont les plus exposés à la décharge électrique; mais si ces corps sont armés de pointes métalliques comme les tiges des paratonnerres, l'électricité négative, attirée du sol par l'influence du nuage, s'écoule dans l'atmosphère et va neutraliser l'électricité positive de la nue. Par conséquent, non seulement un paratonnerre s'oppose à l'accumulation de l'électricité à la surface de la terre, mais encore il tend à ramener les nuées orageuses à l'état neutre, double effet qui a pour but de prévenir la chute de la foudre. Cependant le dégagement d'électricité est parfois si abondant, que le paratonnerre est insuffisant pour décharger le sol, et que la foudre éclate; mais c'est alors le paratonnerre qui reçoit la décharge, en raison de sa plus grande conductibilité, et l'édifice est préservé.

Expérience. — L'expérience a appris qu'une tige de paratonnerre protège autour d'elle un espace circulaire d'un rayon double de sa hauteur. Par conséquent, un bâtiment de 64 mètres de longueur est préservé par deux tiges de 8 mètres, distantes de 32 mètres.

Un paratonnerre, pour être efficace, doit satisfaire aux conditions suivantes : 1° la tige doit être assez grosse pour ne pas être fondue si la foudre tombe dessus; 2° elle doit se terminer en pointe, pour donner plus facilement issue à

l'électricité qui se dégage du sol : c'est pour satisfaire à cette condition qu'on termine ordinairement la tige par une pointe de platine ou de cuivre rouge doré, afin d'éviter l'oxydation ; 3° le conducteur ne doit présenter aucune solution de continuité depuis la tige jusqu'au sol ; 4° la communication entre la tige et le sol doit être le plus intime possible ; 5° si le bâtiment qu'on arme d'un paratonnerre renferme des pièces métalliques d'une certaine étendue, comme une couverture de zinc, des gouttières de métal, des charpentes de fer, on doit les faire communiquer avec le conducteur du paratonnerre.

Si les trois dernières conditions ne sont pas remplies, on est exposé aux *décharges latérales*, c'est-à-dire entre le conducteur et l'édifice, et alors le paratonnerre ne fait qu'accroître le danger. Il faut se rappeler qu'*un paratonnerre mal construit est plus dangereux pour un édifice que l'absence de paratonnerre*.

1138. Paratonnerre Melsens. — On construit, depuis quelques années, d'après les indications de M. Melsens (de Bruxelles), des paratonnerres beaucoup moins volumineux que celui de Franklin, moins coûteux et qui paraissent au moins aussi efficaces.

Le paratonnerre Melsens est une application d'un principe d'électricité sta-

Fig. 1015.

tique, démontré ci-dessus : c'est que, *à l'intérieur d'un corps conducteur communiquant avec le sol, il ne peut y avoir aucun effet d'influence électrostatique*. Par suite, on soustraira complètement un édifice à l'action de la foudre en l'entourant d'une espèce de cage ou de grillage métallique communiquant avec le sol. On réalise ce dispositif en faisant courir tout le long du faîte des toits et des angles des murs des conducteurs de fer, tous reliés les uns aux autres et mis en communication avec le sol par un grand nombre de points. A ce système de préservation on ajoute celui de Franklin. Pour cela, on arme toutes les intersections des conducteurs de gerbes de pointes fines en cuivre, qui constituent de petits paratonnerres à pointes multiples, par où l'écoulement de l'électricité peut se faire aisément. L'Hôtel de ville de Bruxelles, les abattoirs de la Villette et l'hôtel Sévigné, à Paris, sont munis de paratonnerres Melsens. La figure 1015 représente une installation de ce genre.

1139. Aurore boréale. — On nomme *aurore boréale*, ou plutôt *aurore polaire*, un phénomène lumineux extrêmement remarquable, qui apparaît fréquemment, dans l'atmosphère, aux deux pôles terrestres. Quand le phénomène se produit au pôle nord, on lui donne le nom d'*aurore boréale* ; celui d'aurore australe lorsqu'il se manifeste au pôle sud. Il paraît résulter de nombreuses observations faites à Melbourne et dans le nord de l'Europe que les aurores boréales et les aurores australes sont simultanées.

Description. — Nous extrayons du *Traité de météorologie* de MM. Becquerel la description suivante d'une aurore boréale observée à Bossekop, en Laponie norvégienne, à 70 degrés de latitude, dans l'hiver de 1838.

« Le soir, entre quatre et huit heures, la brume qui règne habituellement au nord de Bossekop se colore à la partie supérieure. Cette lueur devient régulière et forme un arc vague, d'un jaune pâle, tournant sa concavité vers la terre, et dont le sommet se trouve sensiblement dans le méridien magnétique.

« Bientôt des stries noirâtres séparent régulièrement les parties lumineuses de l'arc. Des rayons lumineux se forment, s'allongent et se raccourcissent lentement ou instantanément, leur état augmentant ou diminuant sensiblement. Les pieds de ces rayons offrent toujours la lumière la plus vive et forment un

Fig. 1014.

arc plus ou moins régulier. La longueur de rayons est très variée; mais tous convergent vers un même point du ciel, indiqué par le prolongement de l'extrémité sud de l'aiguille d'inclinaison; parfois les rayons se prolongent jusqu'à leur point de concours, et figurent ainsi le fragment d'une coupole lumineuse

« L'arc continue à monter vers le zénith, présentant, dans sa lueur, un mouvement ondulatoire. Parfois un de ses pieds, et même tous les deux, abandonnent l'horizon. Alors les plis sont plus prononcés et plus nombreux, l'arc n'est plus qu'une longue bande de rayons qui se contourne et se sépare en plusieurs parties, en formant des courbes gracieuses qui se replient sur elles-mêmes et offrent ce qu'on appelle la *couronne boréale*. L'éclat des rayons, variant subitement d'intensité, atteint celui des étoiles de première grandeur; les rayons dardent avec rapidité, les courbes se roulent et se déroulent comme les plis et replis d'un serpent (fig. 1014). Puis les rayons se colorent : la base est rouge, le milieu vert; le reste conserve sa teinte jaune clair. Enfin l'éclat diminue, les couleurs disparaissent, tout s'affaiblit peu à peu ou s'éteint subitement. »

La Commission scientifique du Nord a observé, en 200 jours, 150 aurores boréales : mais il paraît qu'au pôle nord les nuits sans aurore boréale sont tout à fait exceptionnelles, en sorte qu'on peut admettre qu'il y en a toutes les nuits ; seulement elles ont une intensité très variable. Les aurores boréales sont visibles à des distances considérables du pôle et sur une étendue immense. Quelquefois une même aurore boréale a été vue en même temps à Moscou, à Varsovie, à Rome, à Cadix.

Explication. — On a fait de nombreuses hypothèses sur la cause des aurores boréales. La direction constante de leur arc par rapport au méridien magnétique, et les perturbations qu'elles exercent sur les boussoles montrent qu'elles doivent être attribuées à des courants électriques qui se dégagent des pôles vers les hautes régions de l'atmosphère. Cette hypothèse est confirmée par ce fait, observé le 29 août et le 1er septembre 1859, en France et dans presque toute l'Europe, que deux brillantes aurores boréales ont agi puissamment sur les fils des télégraphes électriques : les sonnettes ont été longtemps agitées, et les dépêches fréquemment interrompues par le jeu spontané et anormal des appareils.

Selon De la Rive, les aurores boréales sont dues à des décharges électriques s'opérant dans les régions polaires, entre l'électricité positive de l'atmosphère et l'électricité négative du globe terrestre, électricités séparées elles-mêmes par l'action du soleil, principalement dans les régions équatoriales.

MÉTÉORES LUMINEUX.

1140. Arc-en-ciel. — L'*arc-en-ciel* est un météore lumineux qui apparaît dans les nues opposées au soleil quand elles se résolvent en pluie ; il est formé de sept arcs concentriques présentant successivement les couleurs du spectre solaire. Quelquefois on n'observe qu'un seul arc-en-ciel ; mais le plus souvent on en voit deux : l'un, intérieur, dont les couleurs sont vives ; l'autre, extérieur, qui est plus pâle et dans lequel l'ordre des couleurs est renversé. Dans l'arc intérieur, c'est le rouge qui est le plus élevé ; dans l'autre arc, c'est le violet. Rarement on aperçoit trois arcs-en-ciel ; la théorie indique qu'il peut en exister un plus grand nombre, mais leurs couleurs sont si faibles, qu'elles échappent à la vue.

C'est la décomposition de la lumière blanche du soleil au moment où elle pénètre dans les gouttes de pluie et sa réflexion sur leur face interne qui produisent le phénomène de l'arc-en-ciel. Ce phénomène s'observe en effet dans les gouttes de rosée, dans les jets d'eau, partout, en un mot, où la lumière solaire pénètre dans les gouttes d'eau, sous un certain angle.

L'apparition de l'arc-en-ciel et son étendue dépendent de la position de l'observateur et de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon ; d'où l'on doit conclure que tous les rayons réfractés par les gouttes de pluie et réfléchis sur leur concavité vers l'œil du spectateur ne sont pas propres à produire le phénomène. Ceux qui peuvent lui donner naissance ont reçu le nom de *rayons efficaces*.

La lune produit aussi des arcs-en-ciel, mais très pâles.

1141. Halos. — Les *halos* sont des cercles irisés qui apparaissent parfois autour du soleil et lui sont concentriques. Tantôt le halo est simple, c'est-à-dire formé d'un seul cercle ; tantôt il est double, c'est-à-dire formé de deux cercles. Dans les deux cas, la bande rouge est en dedans et la bande violette en dehors, pâle et diffuse. Le demi-diamètre apparent du petit halo est de 23°, celui du grand de 46° (fig. 1015).

Les halos ont pour cause la décomposition de la lumière solaire à travers de très petits prismes de glace dont certains nuages sont formés. L'aéronaute

Duruof a rencontré dans l'une de ses ascensions un pareil nuage à la hauteur de 3500 mètres.

1142. **Parhélies, cercles parhéliques, couronnes.** — On nomme *parhélies*, ou *faux soleils*, des images pâles du soleil qui apparaissent aux extrémités du diamètre horizontal du petit halo, un peu en dehors (fig. 1015). On explique les parhélies en admettant que les prismes de glace, tombant dans l'espace en

Fig. 1015.

vertu de leur poids, tombent en plus grand nombre dans la position verticale qui présente moins de résistance à l'air, et que, par suite, les rayons efficaces sont plus abondants dans le plan horizontal qui passe par le centre du soleil. De là un plus grand éclat dans les points où le halo est coupé par ce plan. Il se produit aussi des parhélies sur le halo extérieur, mais beaucoup moins intenses.

Le *cercle parhélique*, ou *cercle blanc* parce qu'il ne présente aucune coloration, est un cercle horizontal AB passant par le centre du soleil. Son manque de couleur montre qu'il n'est pas un phénomène de réfraction, mais seulement de réflexion sur les facettes de glace.

Enfin, on nomme *couronnes* des cercles concentriques au soleil ou à la lune, qui apparaissent lorsque de légers nuages passent devant ces astres. Les couronnes sont au nombre de trois ou quatre, le rouge à l'extérieur et le violet en dedans. Le diamètre apparent de la plus petite est de 1 à 4 degrés. Elles sont dues aux rayons qui émergent, à chaque incidence intérieure, des petites gouttelettes interposées entre l'astre et l'œil de l'observateur.

CHAPITRE II

CLIMATOLOGIE.

1143. Température moyenne. — On nomme *température moyenne*, ou simplement *température d'un jour*, celle qu'on obtient en faisant la somme de 24 observations thermométriques prises successivement d'heure en heure, et en la divisant par 24. L'expérience a appris qu'on obtient très approximativement cette température en prenant la moyenne entre les températures maxima et minima du jour et de la nuit, lesquelles se déterminent à l'aide des thermomètres à maxima et à minima. Ceux-ci doivent être à l'abri des rayons solaires, élevés au-dessus du sol, et éloignés de tout corps qui pourrait les influencer par son rayonnement.

La température d'un mois est la moyenne de celles des trente jours, et la température de l'année est la moyenne de celles des douze mois. Enfin, la *température d'un lieu* est la moyenne de sa température annuelle pendant un grand nombre d'années. Dans tous les cas, ces températures sont celles de l'air, et non celles du sol.

La température moyenne vraie d'une contrée ne peut être déterminée à une fenêtre, ni dans l'intérieur d'une ville, ainsi que M. Renou l'a fait voir. Celle de Paris est actuellement de 9°,9.

1144. Causes qui modifient la température de l'air. — Les causes qui font varier la température de l'air sont principalement la latitude, l'altitude, la direction des vents et la proximité des mers.

1° *Influence de la latitude.* — L'influence de la latitude résulte du plus ou moins d'obliquité des rayons solaires ; car, la quantité de chaleur absorbée étant d'autant plus grande que les rayons approchent davantage de l'incidence normale, il en résulte que la chaleur absorbée par le sol décroît de l'équateur vers les pôles, puisque les rayons sont de plus en plus obliques à l'horizon. Toutefois cette perte est compensée en partie, pendant l'été, dans les zones tempérées et dans les zones glaciales, par la longueur des jours. Sous l'équateur, où la longueur des jours est constante, la température est à peu près invariable ; à la latitude de Paris, et dans les contrées plus septentrionales, où les jours sont très inégaux, la température varie beaucoup ; mais, l'été, elle s'élève quelquefois presque aussi haut que sous l'équateur. Du reste, l'abaissement de la température résultant de la latitude est lent ; ainsi, en France, par exemple, il faut avancer vers le nord de 185 kilomètres pour trouver un refroidissement de 1 degré dans la température moyenne de l'air.

2° *Influence de l'altitude.* — L'altitude, c'est-à-dire la hauteur au-dessus du niveau des mers, imprime à la température de l'atmosphère un décroissement beaucoup plus rapide que celui qui résulte de la latitude. En effet, dans une ascension sur le Mont-Blanc, Saussure a observé un abaissement de température de 1 degré pour une hauteur de 144 mètres ; Humboldt, sur le Chimboraço, a trouvé 1 degré d'abaissement pour 218 mètres. En prenant la moyenne de ces deux nombres, on a un refroidissement de 1 degré pour une hauteur de 181 mètres, ce qui donne un décroissement de température près de mille fois plus rapide pour l'altitude que pour la latitude.

La loi de l'abaissement de la température, quand on s'élève dans l'atmosphère, est parfaitement connue, mais elle est modifiée par de nombreuses causes perturbatrices, lesquelles sont les vents régnants, le degré d'humidité, l'heure de

la journée, etc. L'expérience apprend que la di
lieux inégalement élevés n'est point proportio
mais que, pour des hauteurs peu considérable
vement cette loi. On évalue moyennement l'al
l'air à 1 degré pour 187 mètres d'élévation da
pour 150 mètres dans la zone tempérée ; ma
beaucoup selon les circonstances locales.

Le refroidissement de l'air, à mesure qu'on
censions aérostatiques ; ce qui le prouve enco
qui recouvrent les sommets des hautes monta
neiges persistantes se trouve à la hauteur de 2
teur, elle est à 4800 mètres. Les causes de la
les hautes régions de l'atmosphère sont : 1
laquelle diminue son pouvoir absorbant ; 2° l
échauffer l'air par son contact ; 3° le grand pou
fin la diminution de pression, par suite de la
sol se dilate considérablement ; or on a vu que
de froid intense.

3° *Influence de la direction des vents.* — I
ment de la température des contrées qu'ils on
un même lieu, a une grande influence sur la
vent le plus chaud est le vent du sud ; viennen
sud-ouest, d'ouest, d'est, du nord-ouest, du no
qui est le plus froid. Du reste, le caractère de
le vent d'est, par exemple, qui est froid l'hive

4° *Influence de la proximité des mers.* —
élever la température de l'air et à la ren
observe que, sous les tropiques et dans les ré
rature des mers est toujours plus élevée qu
l'uniformité de température des mers, l'expérie
tempérées, c'est-à-dire de 25 à 50° de latitud
entre le maximum et le minimum d'un jour
tandis que sur les continents cette différence
les îles, l'uniformité de température est très
fortes chaleurs. En pénétrant dans les contin
deviennent plus froids, et la différence entre
hivers devient plus grande

5° *Influence des villes.* — L'influence des vill
moyenne des températures, les minima y sont
plus élevés que dans la campagne. Ainsi, pour
étudiées avec soin, M. Angot a constaté entre l
toire du parc Saint-Maur et celles notées au B
écart de 1° en 1889 ; 0°,96 en 1890 et 1°,05 en 1
qui a établi les mêmes comparaisons entre
toire du parc Saint-Maur et ceux obtenus à
Jacques situé au milieu même de la capitale,
un excès de 0°,72. On voit que l'influence des
donner dans certains cas une moyenne supéri
la région.

1145. **Lignes isothermes.** — Lorsqu'on joint e
points dont la température moyenne est la m
Humboldt a fait connaître le premier, et qu'
lignes isothermes. Si la température d'un lieu
rayons solaires, c'est-à-dire qu'avec la latitu
toutes des parallèles à l'équateur ; mais e

l'influence de plusieurs causes locales, et surtout avec la hauteur, ces lignes sont toujours plus ou moins sinueuses. Toutefois sur les mers elles s'éloignent peu du parallélisme. On distingue encore des *lignes isothères* (d'égal été) et des *lignes isochimènes* (d'égal hiver). Enfin, on nomme *zone isotherme* l'espace compris entre deux lignes isothermes.

Les figures 1016 et 1017 représentent, d'après Humboldt, les sinuosités des lignes isothermes dans les deux hémisphères nord et sud, ceux-ci étant tracés en projection stéréographique sur le plan de l'équateur. Les lignes isothermes y correspondent aux températures moyennes de 5 en 5°, depuis — 15 jusqu'à + 25° Au delà est l'*équateur thermique*, c'est-à-dire la ligne qui réunit tous les points ayant la température moyenne annuelle la plus haute. Cette ligne est marquée + 28°. On voit qu'elle n'est pas parallèle à l'équateur, mais s'en écarte dans le golfe d'Oman jusqu'à l'approche du parallèle de 15°; puis elle passe dans l'hémisphère sud aux îles Célèbes, s'approche des îles Salomon, et revient couper l'équateur par 157° de longitude occidentale.

A l'inspection de la figure 1016, on remarque qu'en se rapprochant du pôle nord les courbes isothermes s'allongent de plus en plus de l'est à l'ouest, et qu'au delà de la ligne — 15° il y a dédoublement en deux courbes distinctes autour de deux points P, P', qu'on a nommés *pôles du froid*, et dont Arago a estimé par le calcul la température moyenne à — 25°. L'un de ces pôles est situé en Amérique, près des îles Parry, l'autre en Asie.

Les lignes isothermes de l'hémisphère sud sont moins connues que celles de l'hémisphère nord; la figure 1017 montre qu'elles sont plus régulières ce qui résulte des vastes mers de l'hémisphère austral.

A l'aide des lignes isothermes, il est facile de suivre, à la surface de la terre, les zones caractérisées par la rigueur ou la douceur de leur température moyenne. Par exemple, la zone tempérée de + 10 à + 15°, qui en Europe est comprise entre les latitudes de 50 à 42°, est située dans l'Amérique du Nord entre les latitudes beaucoup plus méridionales de 40 à 36°.

1146. **Climats.** — On comprend sous le nom général de *climat* l'ensemble des conditions atmosphériques qui caractérisent une contrée : la température moyenne annuelle, les températures estivale et hibernale, l'humidité de l'air et du sol, les vents, la pression barométrique, la sérénité du ciel. Classés d'après leur température annuelle moyenne, les climats se divisent en sept principaux : 1° *climat brûlant*, de 27°,5 à 25°; — 2° *climat chaud*, de 25° à 20°; — 3° *climat doux*, de 20 à 15°; — 4° *climat tempéré*, de 15 à 10°; — 5° *climat froid*, de 10 à 5°; — 6° *climat très froid*, de 5° à zéro; — 7° *climat glacé*, au-dessous de zéro.

Ces climats se divisent eux-mêmes en *climats constants*, dont la différence de température entre l'hiver et l'été ne dépasse pas 6 à 8°; en *climats variables*, dont la même différence s'élève de 16 à 20°; et en *climats excessifs*, pour lesquels cette différence est plus grande que 30°. Les climats de Paris et de Londres sont variables; ceux de Pékin et de New-York, excessifs. Les climats des îles sont généralement peu variables, la température de la mer étant à peu près constante; de là encore la distinction en *climats marins* et en *climats continentaux*. Le caractère des climats marins est que la différence de température entre l'été et l'hiver est toujours beaucoup moindre que pour les climats continentaux. Du reste, comme on l'a vu ci-dessus, la température plus ou moins élevée n'est pas le seul caractère qui détermine les climats : ils le sont encore par le plus ou moins d'humidité de l'air, par la quantité et la fréquence des pluies, par le nombre des orages, par la direction et l'intensité des vents, enfin par la nature du sol. Ces causes réunies font que l'étude des climats, ou *climatologie*, est encore une science fort peu connue.

1147. **Distribution de la température à la surface du globe.** — La *température de l'air*, à la surface du globe, va en décroissant de l'équateur au

Buenos-Ayres . . . . . 15°,1 | Ile Melville . . .

1148. Température des mers, courants marins. — La température de la mer entre les tropiques est généralement à peu près la même, à la surface, que celle de l'air; dans les régions polaires, la mer est toujours plus chaude que l'atmosphère.

La température de la mer, sous la zone torride, est constamment de 26 à 27° à la surface; elle diminue quand la profondeur augmente, et, dans les régions tropicales comme dans les régions tempérées, la température de la mer à de grandes profondeurs se maintient entre 1°,7 et 3°,5. On explique la basse température des couches inférieures par l'effet des courants sous-marins qui portent vers l'équateur l'eau froide des mers polaires, tandis que des courants chauds, se dirigeant de l'équateur vers les pôles, atténuent l'intensité du froid dans ces latitudes élevées.

OCEAN
Equateur Thermique
Tropique du Capricorne
Cercle Polaire Antarctique
POLE SUD
NOUVELLE ZELANDE
AUSTRALIE
PACIFIQUE
ATLANTIQUE
Ile Ste Hélène
I. de l'Ascension
Ile Tristan d'Acunha
Cap de B. Espérance
Cap Horn
Cap Frio
Rio Janeiro
Cap Blanc
Cap Vert
Cap Finisterre
Cap de la Bonne Espérance
Cap Leeuwin
Cap Tasman
Cap Nord
Cap Ste Marie
Cap Ste Marie
Cap Ste Marie

du Sud jusqu'au golfe du Mexique, d'où il sort pour se diriger vers le nord. Arrivé au banc de Terre-Neuve, il se bifurque en deux courants secondaires, dont l'un gagne l'Islande et la Norvège pour aller se perdre dans la mer Glaciale, tandis que l'autre, revenant vers le sud, gagne le golfe de Gascogne, et retourne vers le tropique en longeant les côtes occidentales de l'Afrique.

Il existe aussi dans l'océan Pacifique un grand courant marin se dirigeant du golfe du Bengale vers le détroit de Bering. Tous ces courants ont pour cause la différence de température et, par suite, de densité des eaux chaudes de la mer sous les tropiques et des eaux froides des mers glaciales, et aussi la direction des vents et la configuration des côtes et des bas-fonds.

On a longtemps admis qu'il existait au fond des mers une couche invariable à 4°; mais les nombreux sondages opérés depuis quelques années par les marines française et anglaise ont fait voir que, dans les régions tempérées et dans les régions tropicales, la température moyenne des deux océans, à de grandes profondeurs, est de 2°,6. On a vu ci-dessus que cette basse température est due à des courants de fond, des pôles vers l'équateur, tandis que des courants de surface, plus chauds et moins denses, vont de l'équateur vers les pôles.

Vu les énormes pressions qui s'exercent dans les mers profondes, on croyait que la vie animale cessait de s'y maintenir; mais la sonde en ramène abondamment des animaux d'ordre inférieur, remarquables par leurs formes et leurs couleurs, et doués presque tous d'une phosphorescence éclatante, comme pour suppléer à la lumière du jour.

1149. Température des lacs et des sources. — La température des lacs présente des variations beaucoup plus grandes que celle des mers; leur surface, qui peut se congeler pendant l'hiver, s'échauffe l'été jusqu'à 20 ou 25°. Le fond, au contraire, conserve sensiblement une température de 4°, qui est celle du maximum de densité de l'eau.

Les sources provenant des eaux pluviales qui se sont infiltrées dans l'écorce du globe à des profondeurs plus ou moins considérables tendent nécessairement à se mettre en équilibre de température avec les couches terrestres qu'elles traversent. Par conséquent, lorsqu'elles arrivent à la surface du sol, leur température dépend de la profondeur qu'elles ont atteinte; si cette profondeur est celle de la couche invariable, la température des sources est de 11 à 12° dans nos contrées, où telle est la température de cette couche, et à peu près aussi la température moyenne annuelle. Toutefois, si la source est peu abondante, sa température est élevée en été et refroidie en hiver par celle des couches qu'elle traverse pour arriver de la couche invariable jusqu'à la surface du sol. Mais si les sources arrivent d'une profondeur plus grande que celle à laquelle est située la couche invariable, leur température peut dépasser de beaucoup la température moyenne du lieu, et elles prennent alors le nom d'*eaux thermales*. Voici la température de quelques eaux thermales :

En France.	Vichy.	40°
—	Mont-Dore.	44°
—	Bourbonne	50°
—	Dax (Landes).	69°
—	Chaudes-Aigues.	88°
En Amérique.	Trincheras, près de Puerto-Cabello.	97°
En Islande.	Le Grand-Geyser, à 20 mètres de profondeur.	124°

Par leur haute température, les eaux thermales acquièrent la propriété de dissoudre plusieurs des substances minérales qu'elles rencontrent dans leur trajet, et elles se désignent alors sous le nom d'eaux minérales. Les substances

qu'elles tiennent en dissolution sont le plus souvent les acides sulfureux, sulfhydrique, chlorhydrique, sulfurique, et des sulfures, des hyposulfites, des sulfates, des carbonates, des chlorures, des iodures.

La température des eaux thermales n'est point modifiée, en général, par l'abondance des pluies ou par la sécheresse; mais elle l'est par les tremblements de terre, après lesquels on l'a vue quelquefois s'abaisser, d'autres fois s'élever.

1150. **Distribution des eaux à la surface du globe.** — La distribution des eaux à la surface du globe exerce une grande influence sur les climats. Les eaux présentent une superficie beaucoup plus grande que celle des continents, et leur distribution est très inégale dans les deux hémisphères. La surface du globe, en myriamètres carrés, étant de 5 100 000, on trouve que celle des mers et des lacs est de 3 700 000 myriamètres carrés, et celle des continents et des îles de 1 400 000, c'est-à-dire que la surface des eaux est à peu près trois fois plus grande que la surface des terres. Dans l'hémisphère austral, la surface des mers est plus grande que dans l'hémisphère boréal dans le rapport de 13 à 9.

La profondeur des mers est très variable. La sonde rencontre le fond, en général, à 300 ou 400 mètres; mais en pleine mer elle descend jusqu'à 9000 mètres, qui est la plus grande profondeur observée. D'après ces nombres, la masse totale des eaux, à la surface du globe, ne dépasse pas une couche liquide qui aurait 1000 mètres de hauteur et envelopperait toute la terre.

CHAPITRE III

PRÉVISION DU TEMPS.

1151. **Observations météorologiques.** — Dès la fin du siècle dernier, Borda, Lavoisier, Laplace, entrevirent la possibilité de la prévision du temps à courte échéance par l'observation des phénomènes météorologiques. Des études dans cette voie furent faites plus tard par Humboldt et par d'autres physiciens; mais c'est surtout depuis une trentaine d'années que le lieutenant Maury, de la marine américaine, et le contre-amiral Fitz-Roy, de la marine anglaise, ont fait voir l'importance d'observations météorologiques, continues et combinées, sur tous les points du globe. Depuis on a successivement établi un vaste réseau d'observatoires météorologiques reliés entre eux par des fils télégraphiques, en sorte qu'aujourd'hui un même observatoire peut suivre simultanément, sur une immense partie du globe, les grands courants de l'atmosphère, et prévoir plusieurs jours à l'avance les contrées vers lesquelles ils se dirigent.

1152. **Signes du temps.** — Les *signes* ou *pronostics du temps* sont : la direction et la force du vent à diverses altitudes, la hauteur du mercure dans le baromètre, la température de l'air, son état hygrométrique, l'état du ciel, et enfin les mouvements de l'aiguille aimantée.

Observés isolément et dans une seule localité, ces signes seraient incertains; ce n'est que par des observations simultanées, sur une grande étendue de pays, qu'on peut arriver à des résultats qui méritent confiance. Les signes qu'on doit surtout consulter sont la direction du vent et la hauteur du baromètre.

1153. **Pronostics tirés des vents et des tourbillons.** — L'étude de la force et de la direction des vents est une des plus importantes pour les pro-

nostics du temps; c'est elle qui est la base des prévisions fournies par les observatoires.

On sait que la direction des vents se détermine par les girouettes; mais celles-ci ne donnent la direction des vents qu'à la surface du sol. Les nuages seuls et les ballons marquent la direction dans les hautes régions, et en même temps la vitesse. Il est à observer toutefois que la vitesse apparente des nuages est d'autant plus faible qu'ils sont plus élevés, et que leur direction précède souvent celle donnée par les girouettes.

Limitant ici à l'Europe et surtout à la France l'étude de l'influence des vents, remarquons qu'outre les grands courants équatoriaux et polaires, étudiés précédemment (1168), il existe dans l'Atlantique nord un vaste courant aérien qui souffle de l'Amérique du Nord vers l'Europe. Il atteint celle-ci au nord des îles Britanniques, où il se transforme en vent du nord-ouest et en vent du nord, à mesure qu'il s'étend sur le continent. Sa vitesse moyenne est de 36 kilomètres à l'heure, mais elle varie avec les saisons.

Par suite de la rencontre des courants équatoriaux avec le courant atlantique nord, il se produit presque constamment, dans la masse de ce dernier, des mouvements tournants qu'on désigne sous le nom de *tourbillons*, et qui, dévient vers le sud avec le courant atlantique, se font sentir depuis le nord de la Norvège jusque sur les côtes de Portugal.

Par l'effet de leur mouvement tournant, les tourbillons aspirent l'air froid des hautes régions de l'atmosphère, et, cet air froid condensant les vapeurs contenues dans le courant équatorial, il en résulte que les tourbillons sont toujours accompagnés de pluie. Un tourbillon isolé étant de courte durée, il en est de même de la pluie qui l'accompagne; mais si plusieurs tourbillons se succèdent sans interruption, ce qui est fréquent, on a des pluies prolongées.

Dans l'Europe occidentale, ce sont principalement le courant de l'Atlantique et les tourbillons qui s'y forment qui occasionnent les changements dans l'atmosphère, et ce sont eux qui donnent naissance aux bourrasques et aux tempêtes si fréquentes en hiver sur nos côtes nord-ouest. C'est pourquoi l'art de la prévision du temps, surtout pour le nord et l'ouest de la France, consiste à suivre d'une manière continue la marche de ces grandes perturbations atmosphériques sur la mer du Nord et sur la Baltique.

1154. **Pronostics tirés de la hauteur du baromètre.** — 1° *Variations normales de la hauteur barométrique.* — Lorsqu'on observe le baromètre pendant plusieurs jours, on remarque que sa hauteur varie en chaque lieu, non seulement d'un jour à l'autre, mais encore dans une même journée.

L'amplitude des variations, c'est-à-dire la différence moyenne entre la plus grande et la plus petite hauteur, n'est pas partout la même. Elle croît de l'équateur vers les pôles. Les variations maxima, sauf les cas extraordinaires, sont de 6 millimètres sous l'équateur, de 30 sous le tropique du Cancer, de 40 en France, à la latitude moyenne, et de 60 à 25 degrés du pôle. Enfin, les plus fortes variations ont lieu en hiver.

On nomme *hauteur moyenne diurne* le nombre qu'on obtient en faisant la somme de vingt-quatre observations successives du baromètre, prises d'heure en heure, et en divisant cette somme par 24. Ramond a constaté qu'*à notre latitude la hauteur du baromètre à midi est sensiblement égale à la moyenne du jour.*

La *hauteur moyenne mensuelle* s'obtient en additionnant les hauteurs moyennes diurnes pendant un mois, et en divisant la somme par 30.

Enfin, la *hauteur moyenne de l'année* se détermine en ajoutant les hauteurs moyennes de chaque jour pendant un an, et en divisant la somme par 365.

On a découvert qu'en chaque lieu *la moyenne annuelle est constante*, mais qu'elle varie d'un lieu à un autre. Si l'on réduit au niveau de la mer ces moyennes annuelles, on met en évidence une variation exclusivement due à la

latitude. Sous l'équateur, la moyenne annuelle, au niveau des mers, est 0,758 m. Elle croît à partir de l'équateur, et atteint, entre les latitudes de 30 à 40 degrés, un maximum de 0,765 m. Elle décroît dans les latitudes plus élevées, et à Paris elle n'est que de 0,7568 m.

La *hauteur moyenne générale, au niveau des mers*, est de 0,761 m.

Les moyennes mensuelles ne sont pas constantes en un même lieu; elles sont plus fortes en hiver qu'en été. Cela est une conséquence du refroidissement de l'atmosphère.

Quant aux observations barométriques faites dans une même journée, elles offrent deux sortes de variations : 1° les *variations accidentelles*, qui n'ont aucune régularité dans leur marche, et qui dépendent des saisons, de la direction des vents et de la position géographique : ce sont celles qu'on observe, principalement et presque exclusivement, dans les climats tempérés; 2° les *variations diurnes*, qui se produisent périodiquement à certaines heures de la journée.

A l'équateur et dans les régions intertropicales, on n'observe pas de variations accidentelles; mais les variations diurnes s'y produisent avec une telle régularité, qu'*un baromètre y peut servir d'horloge*. D'après Humboldt, le baromètre baisse depuis midi jusqu'à environ quatre heures : *il atteint alors un minimum*, puis remonte et *atteint un maximum* vers dix heures du soir; puis il baisse de nouveau *jusqu'à un second minimum*, qu'il atteint vers quatre heures du matin; enfin il remonte et *atteint un second maximum* vers dix heures. L'amplitude de l'oscillation de nuit est de 0,84 mm, tandis que celle du jour est beaucoup plus grande : elle va jusqu'à 2,55 mm.

Dans les zones tempérées, il y a aussi des variations diurnes; mais elles sont plus difficiles à constater qu'à l'équateur, parce qu'elles sont continuellement masquées par les variations accidentelles. Cependant on les a mises nettement en évidence en comparant un grand nombre de moyennes d'observations faites aux différentes heures de la journée.

Les heures des maxima et des minima des variations diurnes paraissent être les mêmes dans tous les pays, quelle que soit la latitude; seulement elles varient un peu avec les saisons.

2° *Application des indications barométriques.* — On a déjà vu la relation qui existe entre la hauteur du mercure dans le baromètre et le beau ou le mauvais temps (155), relation qui fait du baromètre l'instrument le plus précieux pour les pronostics du temps; car la hausse ou la baisse n'a pas lieu au moment des changements de temps, mais les précède de quarante-huit heures et plus.

Pour tirer du baromètre tout le parti qu'il peut rendre, on doit tenir compte de l'altitude du lieu où l'on observe, puisque sa hauteur moyenne, qui est de 761 millimètres au niveau de l'Océan, diminue à mesure qu'on s'élève. En outre, il faut tenir compte du mouvement ascendant ou descendant du mercure. En effet, si on lit, par exemple, la hauteur de 750 millimètres, elle n'a pas la même signification suivant qu'elle succède à 745 ou à 755 : dans le premier cas, le baromètre marche vers le beau temps, dans le second vers le mauvais temps.

La vitesse et la direction du vent ont aussi une grande influence sur la hauteur du baromètre. Sous l'équateur, où l'air est animé d'un mouvement ascendant, la pression est faible; sous les tropiques, où le courant d'air est descendant, sa vitesse acquise, refoulant le mercure, le fait monter. Enfin les mouvements tournants étudiés ci-dessus sous le nom de tourbillons sont toujours précédés et suivis d'une forte hausse, tandis qu'en leur partie centrale on observe une baisse d'autant plus prononcée que le mouvement tournant est plus rapide et embrasse une plus grande étendue de pays.

Outre les variations de pression atmosphérique qui résultent des variations *de température, la hauteur* du baromètre est donc soumise à de nombreuses

causes accidentelles. Quoi qu'il en soit, *une forte baisse est toujours le pronostic d'une grave perturbation dans l'atmosphère.* Cependant le beau temps et le calme s'observent encore quand le baromètre est bas, mais alors ils sont de courte durée.

Le baromètre peut être haut par tous les vents; mais c'est par le vent du nord qu'on observe les plus grandes hauteurs moyennes, et par le vent du sud les plus faibles. Enfin, toutes les variations brusques du baromètre, dans un sens ou dans l'autre, sont de courte durée, et annoncent, en général, le mauvais temps.

L'observation du baromètre n'est pas utile seulement aux marins, elle l'est aussi aux cultivateurs. Pour les premiers, ce qu'il importe de prévoir, c'est la direction et la force du vent; pour les seconds, c'est l'état du ciel, c'est-à-dire la probabilité de pluie ou de sécheresse. Il est donc à désirer que l'usage du baromètre pénètre dans nos campagnes. « Un jour viendra, dit M. Marié-Davy, où chaque village aura son baromètre communal comme il a son horloge, et où le cultivateur le consultera chaque jour à la rentrée des champs, ou avant d'entreprendre son travail. »

1155. **Pronostics tirés du thermomètre et de l'hygromètre.** — Les pronostics tirés de ces instruments sont loin de valoir ceux qu'on tire du baromètre et des girouettes. Cependant leurs indications ne sont pas à négliger. Par exemple, l'hiver, le vent soufflant entre le nord et l'est, si le thermomètre est un peu au-dessous de zéro, et si l'hygromètre marque l'humidité, il y a grande probabilité de neige. En été, lorsque à la baisse du baromètre se joint une chaleur accablante, qu'en même temps l'hygromètre est à l'humidité et que des cumulus se montrent à l'horizon, on est menacé d'un orage.

1156. **Pronostics tirés des mouvements de l'aiguille aimantée.** — D'après les observations de M. Marié-Davy, la boussole doit être rangée parmi les instruments propres à donner des indications utiles sur les probabilités des changements de temps. Voici, en effet, comment s'exprime ce savant dans l'*Annuaire météorologique de* 1876, page 179 : « De l'étude que nous en avons commencée avec M. Descroix, il résulte déjà que les perturbations, ou de moindres anomalies, constatées dans la déclinaison, accusent presque toujours, et plusieurs jours à l'avance, le passage d'une bourrasque un peu forte dans le nord-ouest de l'Atlantique, ou l'arrivée des vents pluvieux. On peut donc ainsi être mis sur ses gardes, sauf à demander à d'autres signes l'indication soit de la marche que suivra la tempête, soit de la région d'Europe sur laquelle s'étendront les pluies. »

1157. **Pronostics fournis par le spectroscope.** — M. Piazzi Smyth, à Édimbourg, en observant l'atmosphère avec le spectroscope, a reconnu, dans le spectre de la partie basse du ciel, une bande particulière qui, lorsqu'elle se montre, est un pronostic de pluie encore plus certain que les indications du baromètre. Le savant astronome a fait cette remarque pour la première fois, à Palerme, en 1872. Depuis, il l'a répétée en France et à Édimbourg. C'est surtout en été que M. Smyth trouve le spectroscope efficace pour annoncer la pluie; en hiver, il préfère le baromètre.

FIN.

PROBLÈMES DE PHYSIQUE

AVEC SOLUTIONS

DONNÉS COMME SUJETS DE COMPOSITION A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS ET DANS LES FACULTÉS DE PROVINCE.

Objet et résolution des problèmes de physique. — Les problèmes de physique proposés dans les examens sont, en général, de véritables problèmes d'algèbre, dans lesquels c'est une loi physique ou une définition qui lie les quantités connues à l'inconnue.

Que les données d'un problème soient représentées par des lettres ou des chiffres, sa résolution se compose toujours de deux opérations bien distinctes : 1° *la mise en équation du problème*, c'est-à-dire la traduction algébrique de la relation existant entre l'inconnue du problème et les quantités connues; 2° *la résolution de l'équation*.

La seconde opération, tout algébrique, exige la connaissance des opérations et des règles de l'algèbre. La mise en équation demande avant tout la connaissance des lois et des définitions de la physique. Le principe de physique dont le problème est une application étant connu, on n'aura qu'à appliquer la règle générale de Lacroix pour la mise en équation des problèmes d'algèbre :

Représenter la quantité que l'on cherche par une lettre, puis, raisonnant sur cette lettre absolument comme si la quantité qu'elle représente était connue, indiquer successivement, sur elle et sur les quantités connues du problème, la même série d'opérations qu'on aurait à effectuer pour vérifier l'inconnue si elle était trouvée.

Remarque. — Il est bon de ne remplacer les lettres par les valeurs numériques correspondantes que dans le résultat final.

PESANTEUR, GRAVITATION UNIVERSELLE.

I. — Pendant combien de temps doit tomber un corps dans le vide pour acquérir, à Paris, une vitesse de 600 m, qui est celle d'un boulet de canon?

Solution : $t = 61{,}16$ s.

II. — Quel est le temps nécessaire à un corps pour tomber, dans le vide, d'une hauteur de 100 m ?

Solution : $t = 14{,}28$ s.

III. — Un projectile étant lancé verticalement de bas en haut dans le vide, avec une vitesse initiale de 245,22 m, on demande après quel temps le mobile s'arrêtera pour retomber, et à quelle hauteur il s'élèvera.

Soient a la vitesse initiale imprimée au mobile et t la durée de l'ascension ; la pesanteur agissant pendant ce temps comme force retardatrice, diminue la

vitesse a d'une quantité égale à g en une seconde, et d'une quantité gt au bout de t secondes ; on a donc, au moment où le corps s'arrête,

$$gt = a, \qquad \text{d'où} \qquad t = \frac{a}{g} = \frac{245,22}{9,8088} = 25 \text{ secondes.}$$

Pour calculer la hauteur à laquelle s'élève le mobile, observons que, pendant son ascension, la pesanteur lui enlevant graduellement la vitesse qu'elle lui communiquerait en temps égal s'il tombait, il faut que le corps mette à s'élever à sa plus grande hauteur e précisément le temps qu'il mettrait à en descendre. Donc la hauteur d'ascension peut se calculer par la formule $e = \frac{1}{2} gt^2$.

Solution : $t = 25$ s.
$h = 306\,522$ cm.

IV. — Sur un plan incliné dont la longueur AB égale 1000 m, et la hauteur BC 5 m, quel est l'effort nécessaire pour traîner un poids de 2500 kg, abstraction faite du frottement ?

Solution : $f = 12,500$ kg.

V. — On suppose qu'un homme soulève à la fois 125 boulets de canon du poids de 2 kg ; on demande quel serait le nombre de boulets pareils qu'il pourrait soulever, en déployant la même force musculaire, si la terre avait le volume de la lune, tout étant égal d'ailleurs. Le rayon de la terre étant pris pour unité, on prendra le rayon de la lune égal à 0,27254, et l'on ne tiendra pas compte de l'aplatissement de la terre et de la lune à leurs pôles.

Solution : $n = 459$.

HYDROSTATIQUE, CORPS FLOTTANTS ET POIDS SPÉCIFIQUES.

VI. — La force avec laquelle on manœuvre une presse hydraulique est de 20 kg ; le bras de levier sur lequel agit cette force égale 5 fois celui de la résistance ; enfin, la surface du grand piston vaut 70 fois celle du petit. On demande la pression transmise sur le grand piston.

Solution : $f = 7000$ kg.

VII. — L'une des branches d'un siphon est remplie de mercure à une hauteur de 17,5 cm, l'autre est remplie d'un autre liquide à une hauteur de 42 cm ; ces deux colonnes se faisant équilibre, on demande la densité du second liquide par rapport au mercure et par rapport à l'eau. La densité du mercure est supposée égale à 13,6.

Solution : $n = 0,416$.
$n' = 5,666$.

VIII. — Étant donné un corps A, pesant dans l'air 7,35 g, dans l'eau 5,17 g, et dans un autre liquide B 6,55 g : de ces données, tirer la densité du corps A et celle du liquide B.

D'après l'énoncé, le poids du corps A perd dans l'eau 7,35 g — 5,17 g = 2,18 g ; c'est le poids de l'eau déplacée. Dans le liquide B, il perd 7,35 g — 6,55 g = 1,20 g ; c'est le poids du liquide B sous le même volume que celui du corps et de l'eau. Donc le poids spécifique de A est $\frac{735}{238} = 3,172$, et celui de B $\frac{120}{238} = 0,504$.

Solution : $n_A = 3,172$.
$n_B = 0,504$.

IX. — On a un cube de plomb de 4 cm de côté qu'on veut soutenir dans l'eau en le suspendant à une sphère de liège. Quel diamètre doit avoir celle-ci pour que sa poussée de bas en haut fasse équilibre au poids du cube de plomb, le poids spécifique de ce corps étant de 11,35 et celui du liège 0,24?

Solution : $d = 11,85$ cm.

X. — Deux liquides, dont les densités sont 1 et $\frac{2}{3}$, sont disposés l'un au-dessus de l'autre, et ne se mêlent pas. On plonge dans ces liquides une sphère dont la densité est $\frac{3}{4}$. On demande le rapport des segments qui seront plongés dans les deux liquides quand la sphère sera en équilibre.

Solution : $V = 3V'$.

XI. — Un morceau de bois, dont la densité est 0,729, a la forme d'un cône droit. On le fait flotter sur l'eau de manière que son axe soit vertical. En mettant d'abord le sommet en bas, puis le sommet en haut, on demande quelle fraction de la hauteur du cône s'enfoncera dans chaque cas.

Solution : $n_1 = 0,9$.
$n_2 = 0,647$.

XII. — Un cylindre de bois de hêtre flotte horizontalement sur l'eau (fig. 1018) : on demande le rapport du volume immergé au volume surnageant, sachant que le poids spécifique du hêtre est 0,852.

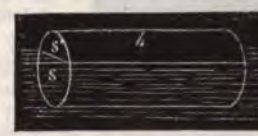


Fig. 1018.

Les deux volumes dont on cherche le rapport ayant même hauteur h, on désignera par S et S' les segments de cercle qui leur servent de bases, le segment S étant immergé et le segment S' surnageant.

Le volume immergé est Sh, le volume surnageant $S'h$, et le volume total du cylindre est $(S + S')h$. Le poids du cylindre est donc $(S + S')h \times 0,852$, et celui de l'eau déplacée Sh; donc

$$(S + S')h \times 0,852 = Sh.$$

Solution : $\frac{S'}{S} = 0,173$.

XIII. — On fabrique avec de l'or, dont la densité est 19,362, des feuilles qui ont un dix-millième de millimètre d'épaisseur; quelle surface pourrait-on recouvrir avec 10 g d'or.

Solution : $x = 5\,m^2\,16\,dm^2\,47\,cm^2$.

XIV. — Un verre à vin de Champagne, de forme conique, a 6 cm de diamètre intérieur sur son bord; il a été complètement rempli de mercure, d'eau et d'huile, en proportion telle, que la couche formée par chacun de ces liquides a 5 cm d'épaisseur. On sait que la densité du mercure est 13,596, celle de l'huile 0,915, et celle de l'eau 1. Calculer le poids du mercure, de l'eau et de l'huile, en négligeant l'influence de la température sur la densité de ces liquides (fig. 1019).

Fig. 1019.

Solution : *poids du mercure* = 71,188 g.
— *eau* = 36,652 g.
— *huile* = 91,027 g.

XV. — Les décimes actuels pèsent 10 g. et sont faits d'un alliage de 0,95 de cuivre, 0,04 d'étain, et 0,01 de zinc; la densité de cuivre est 8,85, celle de l'étain 7,29, et celle du zinc 7,12; combien faudrait-il de ces pièces pour fournir le métal nécessaire à la fabrication d'une sphère de même alliage, ayant 25 cm de diamètre à zéro?

Solution : $x = 7161,7$.

XVI. — Un vase de forme conique a 8 cm de diamètre à son ouverture et 12 cm de hauteur; il est placé d'aplomb et rempli de mercure et d'eau dans des proportions telles, que le poids du mercure est le triple du poids de l'eau. La température est 0°, la densité du mercure 13,598, et celle de l'eau 1. On demande l'épaisseur de chaque couche liquide (fig. 1020).

Fig. 1020.

Solution : $y = 6,78$ cm et $H - y = 5,22$ cm.

XVII. — Le poids spécifique du zinc étant 7 et celui du cuivre 9, quelles quantités de zinc et de cuivre doit-on prendre pour former un alliage qui pèse 50 g et dont le poids spécifique soit 8,2 (en admettant que le volume de l'alliage soit exactement la somme des volumes des métaux alliés)?

Solution : $x = 17,07$ g et $y = 32,93$ g.

XVIII. — Quel est l'effort F nécessaire pour soutenir une cloche pleine de mercure sur la cuve à mercure, son diamètre intérieur étant de 6 cm, sa hauteur *ob* (fig. 1021) au-dessus du niveau du bain de 18 cm, et la hauteur du baromètre étant de 77 cm? (*Problème du baromètre*).

A l'extérieur, cette cloche supporte de haut en bas une pression égale au poids d'une colonne de mercure qui aurait pour base la section *cd* et pour hauteur celle du baromètre; par conséquent cette pression égale $\pi R^2 \times 0,77 \times 13,596$.

Fig. 1021.

A l'intérieur, elle supporte, de bas en haut, une pression égale à la pression atmosphérique, moins le poids d'une colonne de mercure qui aurait pour base la section *cd* et pour hauteur *ob*, c'est-à-dire que la pression de bas en haut égale

$$\pi R^2 \times (0,77 - 0,18) \times 13,596 = \pi R^2 \times 0,59 \times 13,596.$$

L'effort nécessaire pour soutenir la cloche sera donc égal à la différence de ces deux pressions; on a

$$\pi R^2 (0,77 - 0,59) \times 13,596 = \pi R^2 \times 0,18 \times 13,596.$$

En faisant $R = 3$ cm, on trouve $F = 6,919$ kg.

XIX. — A quelle hauteur s'élève l'eau, après le premier coup de piston, dans le tuyau d'aspiration d'une pompe, la course du piston étant de 50 cm, la hauteur du tuyau d'aspiration de 6 m, sa section $\frac{1}{10}$ de celle du piston, et la pression initiale de l'air dans le tuyau d'aspiration étant égale à 10 mètres d'eau?

En représentant par A la section du tuyau, celle du corps de pompe est 10 A

les volumes du tuyau et du corps de pompe sont respectivement 6 et 5. Donc, en représentant par x la hauteur à laquelle s'élève l'eau dans le tuyau, les volumes d'air dans la pompe, avant et après l'ascension du piston, sont 6 à la pression 10, et $5 + 6 - x$ à la pression $10 - x$; d'où

$$6 \times 10 = (11 - x)(10 - x).$$

En résolvant, on trouve $x' = 18{,}26$ m et $x'' = 2{,}74$ m.

La première valeur est une *solution étrangère* qui ne satisfait évidemment pas à la question : donc la hauteur à laquelle s'élève l'eau est 2,74 m.

LOI DE MARIOTTE ET MÉLANGE DES GAZ. — SOLUBILITÉ.

XX. — Un vase contenant 10 litres d'eau est d'abord exposé au contact de l'oxygène, à la pression 78 cm, un temps suffisant pour que l'eau absorbe tout ce qu'elle peut en dissoudre; ce même vase étant ensuite placé dans une atmosphère limitée de 100 litres d'acide carbonique, à la pression 72 cm, on demande les volumes des deux gaz dissous dans l'eau lorsque l'équilibre est établi. Le coefficient de solubilité de l'oxygène est 0,042 et celui de l'acide carbonique est 1.

Le coefficient de solubilité de l'oxygène étant 0,042, 10 litres d'eau en dissolvent $0^{m}{,}42$. Or, ce gaz se comportant comme s'il était seul dans l'espace occupé par l'acide carbonique, occupe un volume de $100^{m}{,}42$, savoir 100 litres à l'état gazeux, et $0^{m}{,}42$ en dissolution dans l'eau. La tension de l'oxygène est donc $78 \times \frac{0{,}42}{100{,}42} = 0{,}326$ cm.

De même, le coefficient de solubilité de l'acide carbonique étant 1, les 10 litres d'eau en dissolvent 10 litres, et le volume du gaz devient 110 litres, dont 100 à l'état gazeux et 10 en dissolution. La tension est donc

$$72 \times \frac{100}{110} = 65{,}454 \text{ cm};$$

par suite la pression totale, après que l'équilibre s'est établi, est

$$0{,}326 + 65{,}454 = 65{,}780 \text{ cm}.$$

Donc le volume d'oxygène dissous, ramené à la pression 65,78 cm, est

$$0^{m}{,}42 \times \frac{0{,}326}{65{,}780} = 0^{m}{,}00208,$$

et celui de l'acide carbonique, à la même pression, $10^{m} \times \frac{65{,}4545}{65{,}780} = 9^{l}{,}95$.

Solution : V (oxygène) $= 0{,}00208$ litre.
V (acide carbonique) $= 9{,}95$ litres.

XXI. — Dans un récipient de 3 litres on fait entrer : 1° 2 litres d'hydrogène à la pression de 5 atmosphères; 2° 4 litres d'acide carbonique à la pression de 4 atmosphères; 3° 3 litres d'azote à la pression de $\frac{1}{2}$ atmosphère. On demande la pression finale du mélange, la température étant supposée constante pendant l'expérience.

Solution : $x = 9^{atm} + \frac{1}{6}$.

pèse 770 fois moins que l'eau.

Solution : $x = 26,996$ g.

XXIII. — La densité de l'air étant 1, celle de l'h
l'acide carbonique, 1,524 à 0° et sous la pression 76
carbonique perd 1,15 g de son poids; on demande
poids dans l'air et dans l'hydrogène.

On demande en outre : 1° si le rapport des pertes
température de 200°, la pression ne changeant pa
même à la pression de 30 atmosphères, la température

Solution : perte de poids dans l'air = 0,75
— dans l'hydrogène = 0,05

Le rapport des pertes de poids dans l'acide carbon
reste pas le même quand la température ou la pre
deux gaz ne sont pas également dilatables, ni égalem

XXIV. — Calculer la force ascensionnelle d'un b
qui, étant vide, pèse 65,620 kg, et qui est rempli d'hy
le taffetas verni pèse 0,250 kg le mètre carré, le mèt
mètre cube d'hydrogène 0,100 kg.

Solution : $f = 394,426$ kg.

XXV. — On a un aréostat sphérique de 4 m
d'hydrogène impur, qui pèse 100 g le mètre; le tat
l'enveloppe pèse 250 g le mètre carré. On demand
gène pour le remplir, et à quel poids il peut faire
pèse 1300 g le mètre cube.

On a $$V = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3,1416 \times 8}{3} =$$

et $$S = 4\pi R^2 = 4 \times 3,1416 \times 4 = 5$$

Par conséquent, le poids de l'hydrogène contenu

MACHINES PNEUMATIQUES ET MACHINES DE COMPRESSION.

. — Sachant que la capacité du corps de pompe d'une machine pneuma-
st $\frac{1}{5}$ de la capacité d'un récipient, calculer après combien de coups de
la pression sera devenue la 200e partie de la pression initiale.

la formule générale $H_n = H_0 \left(\frac{R}{R+C}\right)^n$,

qu'à faire $\frac{H_n}{H_0} = \frac{1}{200}$ et $\frac{R}{R+C} = \frac{R}{R\left(1+\frac{1}{5}\right)} = \frac{5}{4}$.

alors $\frac{1}{200} = \left(\frac{5}{4}\right)^n$.

ant les logarithmes, il vient $n = \frac{\log 200}{\log 4 - \log 5} = 18,4$.

ion : $n = 18,4$.

I. — Un manomètre à air comprimé est divisé en 110 parties d'égale capacité; quand la pression extérieure est de 76 cm, le mercure, dans l'intérieur du tube et dans la cuvette, se tient au zéro de l'échelle. On porte le manomètre sous le récipient d'une machine de compression, et l'on voit le mercure s'élever jusqu'à la 80e division; on mesure alors la hauteur du mercure dans le tube et on la trouve égale à 45 cm : on demande la pression dans la machine (fig. 1022).

ig. 1022.

Solution : pression $= 4^{atm} + \frac{1}{4}$.

XXVIII. — On fait jouer le piston d'une machine pneumatique; la capacité du récipient est de 7,55 litres et il est rempli d'air à la pression 76 cm et à la température 0°.

On demande : 1° le poids de l'air lorsque la pression est réduite à 2,1 cm; 2° le poids extrait par le piston; 3° le poids de i resterait dans la cloche à la tempé-de 15°.

Fig. 1023.

ion : poids de l'air à 2,1 cm = 0,269 g.
— extrait = 9,467 g.
— à 15° = 0,255 g.

. — La cloche d'une machine pneu-
e renferme 5,17 litres d'air; un baro-
communiquant avec la partie supé-
de la cloche marque zéro quand celle-ci
communication avec l'atmosphère (fig. 1023). On ferme la cloche et on
uer la machine; le mercure s'élève alors dans le baromètre d'une hau-
65 cm. Un second baromètre, placé près de la machine, a marqué 76 cm

pendant toute la durée de l'expérience. On demande le poids de l'air qu'on a retiré de la cloche et le poids de celui qui reste, la température étant zéro.

Solution : poids d'air qui reste $= 0{,}596$ g.
poids d'air extrait $= 3{,}525$ g.

ACOUSTIQUE.

XXX. — Le bruit du canon a mis 15 s à se transmettre d'un lieu à un autre, la température étant de 22°; on demande la distance entre ces deux lieux, sachant que la vitesse du son à 0° est de 333 m.

Solution : $x = 5190$ m.

XXXI. — La densité du fer étant 7,8, celle du cuivre 8,9, on demande quel doit être le rapport des diamètres de deux fils cylindriques, l'un de fer, l'autre de cuivre, de longueurs égales et également tendus, pour qu'ils rendent la même note lorsqu'on les fait vibrer transversalement.

Solution : $n = 1{,}068$.

XXXII. — On a laissé tomber une pierre dans un puits et le son qu'elle a produit en rencontrant l'eau ne s'est fait entendre que 5 secondes après qu'on l'a eu lâchée. Quelle est la profondeur du puits, sachant que le son parcourt 337 mètres par seconde ?

Représentons par v la vitesse du son, par x la profondeur du puits jusqu'à l'eau, et par T le temps qui s'écoule entre le commencement de la chute et la perception du son. De la formule $e = \frac{1}{2} g t^2$ on tire $t = \sqrt{\frac{2e}{g}} = \sqrt{\frac{2x}{g}}$; c'est le temps que la pierre met à tomber.

Pour trouver le temps qu'il faut au son pour arriver à l'oreille de l'observateur, remarquons que, l'espace qu'il parcourt par seconde étant v, il lui faudra, pour l'espace x, autant de secondes que x contient de fois v, c'est-à-dire $\frac{x}{v}$.

Donc $\sqrt{\frac{2x}{g}} + \frac{x}{v} = T$, ou $\sqrt{\frac{2x}{g}} = T - \frac{x}{v}$; d'où $\frac{2x}{g} = T^2 - \frac{2Tx}{v} + \frac{x^2}{v^2}$,

ou, en réduisant, $\quad gx^2 - 2v(v + gT)x + v^2 gT^2 = 0.$

Résolvant, on trouve $x = \frac{v}{g} \left\{ gT + v \pm \sqrt{v(2gT + v)} \right\}$.

Remplaçant v, g et T par leurs valeurs, on trouve

$$x = \frac{337}{9{,}81} \left\{ 9{,}81 \times 5 + 337 \pm \sqrt{337(2 \times 9{,}81 \times 5 + 337)} \right\};$$

d'où

$$x = \frac{337}{9{,}81} (366{,}43 \pm 365{,}24).$$

On a deux solutions : $x' = 25\,134{,}9$ m et $x'' = 40{,}8$ m.

Remarque. — La première est à rejeter, car elle représente un espace plus grand que celui que parcourt le son en 5 secondes. C'est une *solution étrangère*.

XXXIII. — Quelle doit être la tension, en kilogrammes, d'une corde de cuivre de 50 cm de longueur et de 0,25 mm de rayon pour qu'elle donne 800 vibrations par seconde ? La densité du cuivre est 8,87.

Solution : $f = 28{,}3958$ kg.

XXXIV. — Un projectile est lancé horizontalement avec une vitesse de 200 m à la seconde; 5 secondes après, on entend le bruit produit par le choc du projectile contre un obstacle. La température étant zéro, on demande de quelle distance l'observateur, placé au point de départ, est éloigné de l'obstacle.

Solution : $x = 624,5$ m.

XXXV. — Un tuyau ouvert donne $ré_3$ pour troisième harmonique : quelle est la longueur de ce tuyau en mètres, la température de l'air étant de 10°?

Solution : $l = 2,295$ m.

XXXVI. — On demande quel est le rang dans l'échelle musicale de l'harmonique 5, lorsqu'il est rendu, à la température de 10°, par un tuyau fermé de 3,23 m de longueur.

Solution : $n = 130,4$ (c'est la note ut_2).

XXXVII. — Un tuyau ouvert donne un son de 100 vibrations par seconde lorsqu'on y souffle de l'air à 10°; quelle devrait être la température de l'air introduit, pour que le son rendu fût la quinte majeure du premier?

On sait que les deux sons qui donnent la quinte sont entre eux comme 3 *est à* 2.

Cela posé, la formule des tuyaux ouverts étant $L = p \cdot \frac{v}{2n}$ (323), *si l'on y fait* $p = 1$, *on trouve pour le son fondamental* $L = \frac{v}{2n}$; *d'où l'on déduit, pour le premier son,* $L = \frac{v'}{200}$, *et pour le second,* $L = \frac{v''}{300}$, v' *étant la vitesse du son à* 10°, *et* v'' *sa vitesse à* θ°. *De ces deux égalités on tire* $\frac{v'}{200} = \frac{v''}{300}$. *Or on a d'autre part* $v' = v\sqrt{1+10\alpha}$ *et* $v'' = v\sqrt{1+\alpha\theta}$. *On a donc*

$$\frac{v\sqrt{1+10\alpha}}{220} = \frac{v\sqrt{1+\alpha\theta}}{300}, \quad ou \quad \frac{1}{2}\sqrt{1+10\alpha} = \frac{1}{3}\sqrt{1+\alpha\theta};$$

en élevant au carré et réduisant, on a enfin

$$9(1+10\alpha) = 4(1+\alpha\theta), \quad ou \quad 5+90\alpha = 4\alpha\theta;$$

résolvant cette dernière équation par rapport à θ, *et remplaçant* α *par sa valeur* 0,00567, *on trouve* $\theta = 768°,6$.

XXXVIII. — Un tuyau ouvert et un bourdon (tuyau fermé) ont l'un et l'autre 2 m de longueur; on demande : 1° quel est le rapport musical qui existe entre les seconds harmoniques de ces tuyaux; 2° quel est le nombre absolu de vibrations qui caractérise l'un ou l'autre de ces tuyaux. — La température est de 20°, le coefficient de dilatation de l'air 0,00367, et la vitesse du son dans l'air à zéro 333 m.

Solution : $n = \frac{6}{5}$ (*tierce mineure*).

$n' = 258,7, \quad n'' = 215,6.$

OPTIQUE.

XXXIX. — *On compare l'intensité d'une lampe Carcel à celle d'une bougie, au moyen du photomètre de* Rumford (fig. 329) et l'on trouve que les ombres

portées sur l'écran paraissent de même intensité lorsque la bougie est à 2 m de l'écran et la lampe à 4,74 m. Quelle est l'intensité de la lampe, celle de la bougie étant prise pour unité?

Solution : $i = 5,617$.

XL. — Une lampe et une bougie sont distantes l'une de l'autre de 7,15 m et, l'intensité de la lumière de la bougie étant 1 à l'unité de distance, celle de la lampe est 5,6; à quelle distance de la lampe, sur la ligne droite qui joint les deux lumières, doit-on placer un écran pour qu'il soit également éclairé par l'une et par l'autre.

Solution : $x' = 2,21$ m et $x'' = 5,45$ m.

Remarque. — La première distance correspond à un point situé entre les deux lumières; la seconde donne un point situé sur le prolongement de la droite qui les joint.

XLI. — Quelle est la hauteur *minima* que doit avoir un miroir plan, placé verticalement, pour qu'une personne se tenant debout devant ce miroir s'y voie par réflexion de la tête aux pieds? Établir la position du miroir.

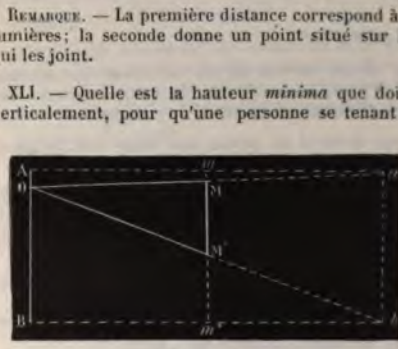


Fig. 1024.

Soient A *le sommet de la tête*, B *les pieds*, O *l'œil*, *et mm' le plan du miroir* (fig. 1024). *On sait que les images des points* A *et* B *se font aux points a et b, qui leur sont symétriques* (552), *et que par suite l'image ab est de même grandeur que l'objet, et la distance ma égale à mA. Or, l'œil voyant l'image ab sous l'angle aOb, il suffit que la hauteur du miroir soit égale à la portion de la droite mm' comprise dans cet angle, c'est-à-dire à* MM'; *mais, dans le triangle Oab,* OM *étant la moitié de* Oa, $MM' = \frac{ab}{2} = \frac{AB}{2}$; *donc la hauteur du miroir doit être au moins la moitié de celle de l'objet.*

Quant à la position du miroir, elle est déterminée par les points où les droites Oa *et* Ob *rencontrent le plan mm'. Le triangle* ObB *fait voir que,* Bm' *étant la moitié de* Bb, m'M' *est la moitié de* BO; *c'est-à-dire que le miroir doit être placé, au-dessus du plan horizontal sur lequel posent les pieds de l'observateur, à une distance égale à la demi-hauteur de l'œil au-dessus du même plan. Dans toute autre position, plus haute ou plus basse, les points* A *et* B *ne se trouveraient pas simultanément dans le champ du miroir.*

XLII. — Un cercle de surface s est placé à une distance p devant une lentille convergente dont les deux faces ont pour rayons respectifs R et R'. On demande de trouver la position et la surface des images produites *par réflexion* sur les deux faces de la lentille et *par réfraction* à travers la lentille.

XLIII. — Un point lumineux réel P est placé sur l'axe principal d'une lentille O dont le diamètre est $2r$, et la distance focale f; un écran est placé au foyer principal du côté opposé de la lentille : quel est le rayon ρ du cercle éclairé par les rayons émanés de P qui ont traversé la lentille?

Discuter la valeur de l'inconnue suivant la valeur de la distance $p = Pa$

point lumineux à la lentille, et suivant que la lentille est convergente ou divergente.

XLIV. — Une lunette astronomique est dirigée vers un objet très éloigné ; un observateur place d'abord l'oculaire, dont la distance focale est 1 cm, de manière à former l'image virtuelle définitive à 15 cm de cette lentille. Il le déplace ensuite de manière à obtenir une image définitive réelle, se formant encore à 15 cm de l'oculaire. Quels sont le sens et la grandeur du déplacement subis par l'oculaire entre les deux expériences?

Quel est le rapport des grandeurs linéaires des images définitives ainsi obtenues?

XLV. — Deux lentilles minces convergentes, de même distance focale, sont placées à 1 m l'une de l'autre de façon que leurs axes principaux coïncident. Un objet étant situé à 1 m de la première lentille, le système en fournit une image réelle située à 3 m de la seconde lentille. Quelle est la distance focale de chacune de ces lentilles?

ÉCHELLES THERMOMÉTRIQUES.

XLVI. — A quelle température le thermomètre centigrade et le thermomètre Fahrenheit marquent-ils le même nombre de degrés?

x étant cette température, on a $(x-32)\times\frac{5}{9}=x$, *d'où* $x=-40^\circ$.

XLVII. — On a deux thermomètres à mercure construits avec le même verre : l'un a une boule dont le diamètre intérieur est 0,75 cm, et un tube dont le diamètre intérieur est 0,25 cm ; l'autre a une boule de 0,62 cm de diamètre, et un tube de 0,15 cm de diamètre intérieur. On demande quel est le rapport de longueur d'un degré du premier thermomètre à un degré du second.

Solution : $\frac{l}{l'}=0{,}638$.

DILATATION DES SOLIDES.

XLVIII. — On a une barre de 3 m d'un métal qui a pour coefficient de dilatation $\frac{1}{754}$; une autre barre de 5 m, d'un autre métal, se dilate, pour un même nombre de degrés, autant que la première : trouver son coefficient de dilatation.

Solution : $x=\frac{3}{3770}$.

XLIX. — Un aréomètre de Fahrenheit pèse 80 g. Lorsqu'il est chargé de 45 g, il affleure dans un liquide dont la température est de 20°, et dont la densité à la même température est 1,5. On demande le volume à 0° de la portion immergée de l'instrument.

Le poids du liquide déplacé est 125 *g, et son volume à* 20° *est* $\frac{P}{D}=\frac{125}{1{,}5}$.

Tel est donc, à cette température, le volume de la portion immergée ; d'où le volume à 0° *est*

$$\frac{125}{1{,}5}\times\frac{1}{1+0{,}00002584\times 20}=83{,}290\ \text{cm}^3.$$

Solution : $V_0 = 85,290$ cm³.

Remarque. — *On prend* 0,00002584 *pour coefficient de dilatation cubique du verre.*

L. — La dilatation du fer pour chaque degré d'élévation de température étant de 0,0000122 de la longueur mesurée à 0°, quelle sera à 60° la surface d'un disque circulaire de tôle qui, à 0°, a 2,75 m de diamètre?

Solution : $S = 5$ m² 94 dm².

LI. — Une règle de platine de 2 m de longueur est divisée, à l'une de ses extrémités, en quarts de millimètre : une règle de cuivre de 1,950 m étant appliquée dessus, à 0°, en diffère de 0,050 m, c'est-à-dire de 200 divisions de la règle de platine. On demande quelle est la température commune aux deux règles lorsqu'elles diffèrent de 164 divisions de la règle de platine, le coefficient de dilatation du platine étant 0,000008842, et celui du cuivre 0,000017182.

Solution : $\theta = 556°$.

LII. — Le rapport entre le poids spécifique du cuivre à zéro et celui de l'eau à 4° est 8,88. Le coefficient de dilatation cubique du cuivre est $\frac{1}{38200}$, et la fraction qui représente la dilatation totale de l'eau, entre 4° et 15°, est $\frac{1}{1360}$. Cela posé, on demande quel est à 15° le rapport des poids spécifiques de ces deux corps.

Solution : $n = 8,94$.

LIII. — De combien s'allongera, en passant de $-15°$ à $+50°$, un fil de fer de 170 kilomètres? Le coefficient de dilatation du fer est $\frac{1}{81900}$.

Solution : $l = 95,4$ m.

DILATATION DES LIQUIDES.

LIV. — Le poids spécifique du mercure étant 13,59 à 0°, on demande quel est à 85° le volume de 50 kg de ce métal. On prendra pour coefficient de dilatation du mercure $\frac{1}{5550}$.

Solution : $V = 2,241$ litres.

LV. — Dans un thermomètre à mercure, on sait que chaque division est $\frac{1}{6480}$ de la capacité du réservoir jusqu'au zéro de la graduation. Cela posé, si l'on vide un semblable thermomètre et qu'on y introduise jusqu'au zéro, dans la glace fondante, un liquide dont le coefficient de dilatation absolue soit $\frac{1}{2000}$, on demande jusqu'à quelle division s'élèvera ce liquide à 20°, le coefficient de dilatation cubique du verre étant $\frac{1}{38700}$.

Solution : $n = 61,45$.

LVI. — Une colonne d'eau de 1,35 m de hauteur et une colonne d'un autre liquide de 3,17 m de hauteur se font équilibre dans les branches d'un siphon.

la température des deux liquides étant 4°; on demande quelle est la densité du second liquide par rapport à l'eau et quelle serait la hauteur à laquelle il s'élèverait si sa température était portée à 25°, celle de l'eau restant à 4° et le coefficient de dilatation absolue du liquide étant $\frac{1}{6000}$.

1° *Les hauteurs des colonnes liquides qui se font équilibre étant en raison inverse des densités, on a*

$$1^m,55 \times 1 = 3^m,17 \times d, \quad d'où \quad d = 0,4889 \text{ à } 4^\circ.$$

2° *En représentant par h la hauteur du même liquide à 25°, par d sa densité à 4° et par d' sa densité à 25°, on a*

$$[1] \qquad 3^m,17 \times d = h \times d';$$

or

$$d' = \frac{d}{1 + \frac{1}{6000}} = 25.$$

Portant cette valeur dans l'égalité [1], *il vient*

$$3^m,17 = \frac{h}{1 + \frac{25}{6000}}, \qquad d'où \qquad h = 3^m,183.$$

Solution : densité $= 0,4889$ à 4°.
hauteur $= 3,183$ m.

LVII. — Un tube de verre cylindrique, fermé à la partie inférieure et lesté avec du mercure, s'enfonce des $\frac{3}{4}$ de sa longueur dans de l'eau à 4°; on demande de combien il plongerait dans de l'eau à 20°. On sait que de 4° à 20° l'eau se dilate de 0,00179 de son volume, et l'on néglige la dilatation du verre de 4° à 20°.

Solution : $x = 0,7513$.

LVIII. — Un tube capillaire étant divisé en 180 parties d'égale capacité, on trouve qu'une colonne de mercure occupant 25 de ces divisions pèse 1,2 g à 0°. Cela posé, voulant faire de ce tube un thermomètre, on demande le rayon intérieur du réservoir sphérique qu'on doit lui souder pour que ses 180 divisions comprennent 150° C.

Solution : $x = 1,85$ cm.

DILATATION DES GAZ.

LIX. — Calculer le poids d'azote qui serait contenu à 32° dans un ballon de verre dont le volume, à 0°, est 12,3 litres, le coefficient de dilatation de l'azote étant 0,003668, le coefficient de dilatation linéaire du verre 0,00000861, et le poids spécifique de l'azote 0,9714; on suppose que la pression atmosphérique égale 76 cm.

Solution : $x = 1,911$ g.

LX. — *On a renfermé un baromètre dans un large tube qu'on a ensuite fermé à la lampe. La température du tube, au moment de sa fermeture, est 13°, et la*

hauteur du baromètre 76 cm : on demande, à 0,001 près, à quelle hauteur s'élèvera le mercure dans le baromètre quand la température de l'air dans le tube sera de 30°.

Solution : $x = 80,771$ cm.

LXI. — Un ballon de verre d'une capacité de 5 litres à 0° est rempli d'acide carbonique à 0° et à la pression 76 cm. On chauffe à 100° après l'avoir ouvert pour permettre la sortie du gaz. La pression étant alors 75 cm, on demande le poids de l'acide carbonique sorti du ballon.

Solution : $x = 2,678$ g.

LXII. — Une vessie à parois flexibles contient 4 litres d'air à 30° et à la pression 76 cm. La pression atmosphérique restant la même, on demande ce que deviendra le volume d'air si l'on descend la vessie à une profondeur de 100 m dans un lac dont la température est de 4°.

Solution : $V = 0,342$ litre.

LXIII. — Dans un ballon de verre dont la capacité à 0° est 250 cm³, on introduit une certaine quantité d'air sec capable d'occuper 25 cm³ à 0° et à la pression 76 cm. Ayant fermé le ballon et chauffé à 100°, on demande la pression intérieure.

Solution : pression (en hauteur de mercure) = 10,36 cm.

LXIV. — Un corps pesé dans l'air, à 0° et à la pression 76 cm, perd 6,527 g de son poids. On demande : 1° le volume du corps ; 2° sa perte de poids à 15° et à la pression 125 cm. — On sait que la densité de l'air par rapport à l'eau est $\frac{1}{770}$, que son coefficient de dilatation est 0,00367, et l'on néglige la dilatation du corps.

Solution : 1° $V = 4,872$ dm³.
2° $f = 9,86$ g.

LXV. — A quelle température un litre d'air sec pèse-t-il 1 g, sous la pression 177 cm, le coefficient de dilatation de l'air étant 0,00367, et le poids d'un litre d'air sec, à 0° et à la pression 177 cm, étant 11,293 g ?

Solution : $t = 84°$ C.

LXVI. — Quelle est à 18°,8 la perte de poids, dans l'air, d'un corps dont le volume à cette température est 5182 m³ ; et quelle serait à 25°,13 la perte de poids du même corps, son coefficient de dilatation étant $\frac{1}{2400}$?

A 10°,8, *la perte de poids est* $\frac{1^{gr},293 \times 1000 \times 5182}{2 + 0,00367 \times 10,8} = 6455^{g},1.$

A 25°,13, *le volume du corps est* $\frac{5182\left(1 + \frac{3 \times 25,13}{2400}\right)}{1 + \frac{3 \times 10,8}{2400}}$ *et, par suite, sa perte de poids est*

$$\frac{1^{gr},293 \times 1000 \times 5182\left(1 + \frac{3 \times 25,13}{2400}\right)}{(1 + 0,00367 \times 25,13\left(1 + \frac{3 \times 10,8}{2400}\right)} = 6242^{g},947.$$

Solution : 1° $f_{18°,8} = 6455,1$ kg.
2° $f_{25°,13} = 6242,947$ kg.

DENSITÉS DES GAZ.

LXVII. — Un ballon vide pèse 150,175 g; plein d'air, il pèse 160,158 g; plein d'un autre gaz 162,233 g. 1° La pression étant invariable, on demande la densité de ce gaz par rapport à l'air; 2° quelle correction on aurait eu à faire si la pression avait été 75 cm pendant la pesée de l'air, et 77 cm pendant la pesée du gaz.

Solution : 1° Densité du gaz = 1,2145.

2° La correction à faire eût été de ramener le poids de l'air et celui du gaz à la pression de 76 cm, et la densité cherchée eût été 1,183.

LXVIII. — Un ballon vide pèse 137,135 g; plein d'air, il pèse 145,257 g; plein d'un autre gaz, 152,118 g. On demande : 1° la densité du gaz par rapport à l'air, lorsque la pression et la température sont restées invariables; 2° la même densité dans le cas où la pression aurait été de 75 cm pendant la pesée de l'air, et de 77 cm pendant la pesée de l'autre gaz; 3° quel genre de correction aurait-il fallu faire si la température avait été de 8° pendant la pesée de l'air, et de 11° pendant celle du gaz?

Solution : 1° Densité du gaz = 1,8819.

2° Densité (2° cas) = 1,833.

3° Il faudrait ramener le poids des deux gaz à zéro, en multipliant le poids de l'air par $1 + 0,00367 \times 8$, et celui du gaz par $1 + 0,00367 \times 11$.

CHALEURS SPÉCIFIQUES.

LXIX. — Dans 25,45 kg d'eau à 12°,5, on met 6,17 kg d'un corps à la température de 80°; le mélange prend une température de 14°,17; on demande quelle est la chaleur spécifique de ce corps.

Solution : $x = 0,101$.

LXX. — La capacité calorifique de l'or est 0,0298, celle de l'eau étant prise pour unité; on demande combien il faudra de ce métal à 45° pour élever de 12°,3 à 13°,7 la température de 1,00038 kg d'eau.

Solution : 3,896 kg.

LXXI. — On a une sphère de platine de 5 cm de rayon à 95°, on la plonge dans 2 litres d'eau à 4°: on demande la température de l'eau lorsque l'équilibre s'est établi. La capacité calorifique du platine est 0,0324; son coefficient de dilatation linéaire est 0,000008812, et sa densité 22,07.

Soient V' *le volume de la sphère à* 95°, V *le volume à zéro, et* P *son poids; on a* $V' = V(1 + 3K\theta)$, *d'où* $V = \frac{V'}{1 + 3K\theta}$.

Or $$V' = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3,141592 \times 125^{\text{cub}}}{3} = 532^{\text{cub}},598;$$

d'où $V = \frac{523,598}{1 + 0,000008842 \times 5 \times 95} = 522,282\ cm^3$, *et* $P = 11,56\ kg$.

Par conséquent, la masse de platine, en se refroidissant de 95 à x degrés, cède, d'après la formule $m(\theta' - \theta)c$, *une quantité de chaleur égale à* $11^k,526 \times (95 - x) \times 0,0324$, *et les 2 litres d'eau, en s'échauffant de 4 à x degrés, absorbent* $2 \times (x - 4)$.

On a donc $2(x - 4) = 11,526 \times 0,0324\ (95 - x)$.

Solution : $\theta = 18^\circ,3$.

LXXII. — La chaleur spécifique du sulfure de cuivre est 0,1212; celle du sulfure d'argent 0,0746. Un mélange de ces deux corps, porté à 40° et plongé dans 6 kg d'eau à 7°,67 en élève la température à 10°. Combien ce mélange contient-il de chaque sulfure?

Solution : $x = 2$ kg et $5 - x = 3$ kg.

LXXIII. — Dans un vase de verre pesant 12 g et contenant 15 *cm* d'eau à 10°, on projette un morceau de fer dont le poids est de 20 g et la température de 98°; la température de l'eau montant alors à 11°,22, on demande la chaleur spécifique du fer, sachant que celle du verre est 0,19768.

Solution : $x = 0,1135$.

LXXIV. — Une masse de platine pesant 40 g est placée dans un four et y reste assez longtemps pour en prendre la température; on la retire ensuite et on la plonge dans une masse d'eau dont le poids est de 84 g et la température de 12°: on observe alors que l'eau s'échauffe jusqu'à 22°. On demande la température du four, sachant que la chaleur spécifique du platine est 0,0325.

Solution : $\theta = 669^\circ,5$.

LXXV. — Ayant pratiqué une cavité dans un morceau de glace, on y enferme une masse d'étain qui pèse 55 g et dont la température a été portée préalablement à 100°. Quel sera le poids de glace fondu, sachant que la chaleur spécifique de l'étain est 0,05625, et que la chaleur de fusion de la glace est 79?

Solution : $x = 3,9$ g.

LXXVI. — Quel est le poids de glace à projeter dans 9 litres d'eau pour les refroidir de 20° à 5°?

Solution : $x = 1,607$ kg.

LXXVII. — Quel est le poids en vapeur d'eau, à 100°, nécessaire pour échauffer, en se condensant, 208 litres d'eau de 14° jusqu'à 32°?

Solution : $x = 6,158$ kg.

LXXVIII. — Dans un premier vase, on a de l'eau à 11°; dans un second, de l'eau à 91°; combien doit-on prendre de kg d'eau dans chacun d'eux pour former un bain de 250 kg à 31°?

Solution : $x = 187,5$ kg.
$y = 62,5$ kg.

CHALEURS LATENTES.

LXXIX. — Combien faut-il de kilogrammes de glace à 0° pour amener à 10° centigrades l'eau contenue dans un bassin à bord circulaire et à fond horizontal, dont la circonférence supérieure est de 8,50 m, la circonférence inférieure de 6,15 m, et la hauteur de 1,76 m, ce bassin étant rempli d'eau à moitié de sa hauteur, et la température de l'eau étant de 30° ?

Fig. 1025.

Soient R *le rayon* OB (fig. 1025) *de la base supérieure, r le rayon* CD *de la base inférieure, r' le rayon* IE, *et h la hauteur* IC *du liquide contenu dans le bassin. On a*

$$R = \frac{8,50}{2\pi} = 1,3210\ m, \qquad r = \frac{6,15}{2\pi} = 0,9788\ m, \qquad IC = 0,88\ m,$$

et

$$r' = \frac{R + r}{2} = 1,1499\ m.$$

Cela posé, le volume V *du liquide étant celui d'un tronc de cône dont la hauteur est h, et dont les rayons des bases sont r et r', on a, d'après un théorème connu de géometrie,*

$$V = \frac{\pi h}{3}(r'^2 + r^2 + rr') = 3,138\,605\ m^3,$$

volume qui représente un poids d'eau de 3138,605 *kg.*

Soit actuellement x le poids de glace nécessaire pour refroidir cette masse d'eau de 30 *à* 10°. *Comme on a vu* (665) *qu'en se fondant* 1 *kilogramme de glace absorbe* 79 *unités de chaleur, x kilogrammes de glace absorbent* 79 *x, pour donner x kilogrammes d'eau à zéro. Or, d'après les données de la question, cette dernière masse, devant elle-même être portée à* 10°, *absorbe, en outre, une quantité de chaleur égale à* 10 *x. D'un autre côté, la chaleur cédée par l'eau est égale à* 3138^k,605 × (30 — 10), *ou* 62772,1. *On a donc l'égalité*

$$79\,x + 10\,x = 62772,1.$$

Solution : $x = 705,504$ kg.

LXXX. — Chercher combien il faut de kilogrammes de vapeur d'eau pour porter un bain de 246 kg d'eau de 15° à 28°, sachant que la chaleur latente de la vapeur d'eau est 540.

Solution : $x = 6,029$ kg.

LXXXI. — Une cuve cylindrique, à fond plat et horizontal, a 1,30 m de diamètre et 0,75 m de hauteur intérieurement ; elle est à moitié pleine d'eau à 4°, et l'on chauffe ce liquide en y faisant arriver de la vapeur à 100° fournie par 5,250 kg d'eau. On demande quelle serait la température du bain ainsi chauffé et quel en sera le volume. On négligera la température du vase, et on prendra pour coefficient de dilatation de l'eau $\frac{1}{2200}$.

Solution : $\theta = 10°,6\ C$ et $V = 504,509$ litres.

LXXXII. — La chaleur latente de la vapeur d'eau étant supposée égale à 540, on demande à quelle température on élèvera 20 litres d'eau à 4°, en y condensant 1 kg de vapeur à 100° et à la pression 76 cm.

Solution : $\theta = 34°,28$.

LXXXIII. — Combien faut-il de kilogrammes de glace à 0° pour liquéfier, et ramener à 0°, 25 kg de vapeur dégagés d'un appareil où le thermomètre marque 100°, le baromètre marquant 76 cm ? La chaleur de fusion de la glace est 79.

Solution : $x = 202,532$ kg.

LXXXIV. — 11 kg de glace à zéro ont été mélangés avec P kg d'eau à 47° ; le mélange a pris la température de 12° ; on demande le poids P.

Solution : $P = 30,333$ kg.

LXXXV. — Dans quelles proportions faut-il partager 1 kg d'eau à 50° pour que la chaleur que l'une de ses parties abandonnerait en passant à l'état de glace à 0° fût suffisante pour transformer l'autre en vapeur à 100°, à la pression 76 cm ? — Chaleur de fusion de la glace 79,25, et chaleur de vaporisation de l'eau 535.

Solution : $x = 0,819$ kg.
$1 - x = 0,181$ kg.

LXXXVI. — On sait (594) que, dans des conditions convenablement choisies, un corps peut rester liquide à des températures inférieures à celle de sa solidification normale. Cela posé, on demande de combien de degrés au-dessous du point de sa fusion il faut refroidir du phosphore liquide pour que, par sa solidification brusque et complète, il remonte au point de fusion. — Chaleur de fusion du phosphore 5,4 ; chaleur spécifique dans le voisinage du point de fusion 0,20.

Solution : $\theta = 27°$.

LXXXVII. — On a abaissé la température d'une masse de phosphore liquide jusqu'à 30° ; à ce moment on y détermine un commencement de solidification. On demande si la solidification est complète, et, si elle ne l'est pas, quelle sera la portion du poids total qui se solidifiera. — Le phosphore fond à 44°,2, sa chaleur de fusion est 5,4 et sa chaleur spécifique, à l'état solide ou liquide, dans le voisinage de la fusion, est 0,2.

Solution : $x = 0,525$.

LXXXVIII. — Un corps solide fond à la température de 44°. Dans trois expériences successives, on introduit dans un calorimètre contenant un grand excès de glace à 0° : 1° 100 g de corps solide à 40° ; 2° 100 g de corps fondu à 50° ; 3° 100 g de corps fondu à 50°.

Les poids de glace fondue dans ces trois expériences quand l'équilibre de température est atteint, sont respectivement : 9,5 gr, 18,2 gr et 25,7 gr. On demande quelles sont les chaleurs spécifiques du corps à l'état solide et à l'état liquide, et quelle en est la chaleur latente de fusion, sachant que la chaleur latente de fusion de la glace est de 80 calories par gramme.

VAPEURS.

LXXXIX. — Dans un vase vide, d'une capacité de 2,02 litres, on a introduit d'abord 1 litre d'air sec sous la pression de 76 cm, puis de l'eau en quantité telle, qu'il en reste, après la vaporisation, 20 cm³ à l'état liquide. On demande la pression intérieure, en supposant que la température soit de 30° au moment de l'expérience, et que la tension maximum de la vapeur d'eau, à cette température, soit de 0,031 m.

Solution : $f = 0,411$ m.

XC. — Une certaine quantité d'air pèse 5,2 g à la température de 0° et sous la pression 76 cm. On la chauffe à 30° sous la pression 77 cm, en lui permettant de se saturer de vapeur d'eau. On demande quel sera alors le volume qu'elle occupera. La tension maximum de la vapeur à 30° est de 3,15 cm et on prendra 1,3 g pour poids du litre d'air sec à la température de 0° et sous la pression 76 cm.

Solution : $V = 4,56$ litres.

XCI. — On donne le poids d'un litre d'air, à 0° et sous la pression 76 cm égal à 1,293 g, ainsi que la densité de la vapeur d'eau $\frac{5}{8}$. On demande quelle est, à 30° et sous la pression 77 cm, le poids d'un mètre cube d'air dont l'état hygrométrique est $\frac{3}{4}$, la tension maximum de la vapeur à 30° étant 3,15 cm.

Solution : $x = 1166,6$ g.

XCII. — On a 3 litres d'air à 30° et à la pression 75 cm, dont l'état hygrométrique est $\frac{3}{4}$. On demande ce que deviendra ce volume d'air, à la même température et à la même pression, si on l'agite avec de l'acide sulfurique concentré, et quel sera l'accroissement de poids que prendra l'acide.

Solution : $v = 2,906$ litres.
$f = 0,067$ g.

XCIII. — Étant donnés 6,85 litres d'air saturé de vapeur d'eau à 11° et sous la pression 76,8 cm, on demande quel sera le volume de cet air desséché à la température de 15° et à la pression 75 cm. — On sait qu'à 11° la tension de la vapeur à l'état de saturation est 1,0074 cm.

Solution : $v = 7,02$ litres

XCIV. — Dans un tube en U contenant de la ponce sulfurique, on fait passer 1 mètre cube d'air à la température de 15°. Le tube en U, pesé avant et après l'expérience, accuse, après le passage de l'air, un excès de poids de 3,95 g; on demande l'état hygrométrique de l'air — On sait que la densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air est $\frac{5}{8}$, et que la tension maximun à 15° est 12,69 mm.

Solution : $x = 0,309$.

XCV. — Une marmite de Papin contient 3,25 kg d'eau à 142°. En ouvrant la soupape, une portion de l'eau se vaporise, et l'autre se refroidit à 100°. On demande le poids de vapeur produit, la chaleur de vaporisation étant 540.

Solution : $x = 0,25$ kg.

XCVI. — Calculer le volume d'air qui, à l'état hygrométrique 0,70, contient 600 g de vapeur à 50°, la tension maximum à 50° étant 31,548 mm, et la densité de la vapeur $\frac{5}{8}$.

Solution : V = 28 364 litres.

XCVII. — On demande, à 0° et sous la pression 76 cm, le poids d'un volume d'air sec, sachant que ce volume saturé, à 18° et à la pression 78 cm, pèse 16,25 g. — La force élastique de la vapeur d'eau à 18° est 15,35 mm, et sa densité égale $\frac{5}{8}$ de celle de l'air.

Solution : $x = 17$ g.

XCVIII. — La densité de l'éther liquide à 0° est 0,75; celle de l'éther gazeux rapporté à l'air 2,5. On demande l'épaisseur que doit avoir à 0° une couche cylindrique d'éther pour que, transformée en vapeur à 38°, dans un tube de même section et de 1 mètre de long, elle donne une vapeur à la tension de 70 cm. — Le poids du litre d'air sec est 1,293 g, et le coefficient de dilatation des gaz 0,00367; l'éther entre en ébullition à 36°, à la pression de 76 cm.

Soient 100 *cm*² *la section du tube, et* x *l'épaisseur de la couche d'éther liquide; son poids, en grammes, est* $100 \times x \times 0,75$. *Quant à la vapeur, son volume en litres est* 10, *et son poids est* $\frac{1,293\,g \times 10 \times 2,5 \times 70}{(1 + 0,00367 \times 39)\,76}$. *Égalant ce poids au premier poids* $100\,x \times 0,75$, *et résolvant, on trouve* $x = 3,5$ mm.

Solution : $x = 3,5$ mm.

XCIX. — On a refroidi, de 50 à 10°, un volume d'air de 500 litres, saturé d'humidité à la pression 76 cm. Quel est le poids de la vapeur condensée, et quel est le volume de l'air refroidi à 10° à la même pression? — Densité de la vapeur d'eau $\frac{5}{8}$; tension maximum à 50° 30,3 mm, à 10° 9,43 mm; poids d'un litre d'air sec 1,293 g; coefficient de dilatation des gaz $\frac{1}{273}$.

Solution : P = 10,1 g.
V = 434 litres.

C. — Un tube barométrique, dont le sommet s'élève à 76 cm au-dessus du niveau dans la cuvette, supposée très large, contient de l'air sec qui occupe au-dessus du niveau du mercure dans le tube une longueur de 10 cm.

On introduit dans le tube un liquide qui se volatilise entièrement et sature l'espace e occupé finalement par le mélange d'air et sa vapeur.

Déterminer x. La pression extérieure est équilibrée par 76 cm de mercure, et la force élastique maximum de la vapeur à la température de l'expérience par 10 cm de mercure.

PROBLÈMES DIVERS

RELATIFS AUX UNITÉS C. G. S.

1° Une force est égale à 80 dynes dans le système C. G. S.; quelle sera sa valeur numérique dans le système de Gauss, dont les unités fondamentales sont le millimètre, la masse du milligramme et la seconde?

Solution : $x = 8 \times 10^5$.

2° Un boulet de canon est lancé avec une vitesse de 608 mètres-seconde : il a une masse de 100 kg. Quelle est en ergs son énergie cinétique?

Solution : $x = 1,8 \times 10^{14}$ ergs.

3° Calculer le poids spécifique, en dynes, par centimètre cube, de l'air sec à 0°, sous une pression de 1,02 mégadyne.

Solution : $x = 1,27$.

4° Évaluer en dynes la pression normale en un lieu qui se trouve par 50° 37' 44" de latitude et à 24 m au-dessus du niveau de la mer.

Solution : $x = 1,01\,376 \times 10^6$.

5° La tension superficielle de l'eau est égale à 77 dynes. Quelle est la valeur numérique x de cette tension en milligrammes par mètre?

Solution : $x = 7,85$.

6° Du mercure, tombant d'une hauteur de 2,225 m s'échauffe de 6°,1573, d'après MM. Cantoni et Gerosa. Déduire de cette expérience la valeur de E, en prenant pour capacité calorifique du mercure le nombre 0,0337. Calculer E dans le système C. G. S.

Solution : $E = 4,15.10^{10}$.

7° Une sphère de 25 cm de rayon est au potentiel 10; un conducteur amené au potentiel 6 est mis en communication lointaine avec cette sphère, et il prend un potentiel 7; calculer la capacité C du conducteur.

Solution : $C = 75$.

8° M. Tæpler fixe une aiguille aimantée au fléau d'une balance orientée dans le méridien, d'abord verticalement, le centre de l'aimant coïncidant avec le centre du fléau, puis horizontalement, et il équilibre par une tare l'action de la terre dans les deux cas; il retourne alors l'aimant bout pour bout et il constate qu'il faut ajouter un poids P dans la première expérience, P' dans la seconde, pour rétablir l'horizontalité du fléau. Déduire de ces observations la valeur de l'inclinaison, sachant que $P = 0,181$ gr et $P' = 0,417$ gr.

Solution : $x = 66°\,32'\,12''$

9° Une machine Carré charge en 100 tours de plateau une batterie de $\frac{1}{10}$ de microfarad, au potentiel de 2500 volts; quel courant peut-elle alimenter à la vitesse de 5 tours par seconde et quelle énergie produit-elle?

Solution : $x = 0,0000125$ ampères,
$y = 0,0312$ joules.

10° Combien faut-il brûler de zinc dans une pile de Bunsen pour produire 75 kgm par seconde *pendant* une heure, c'est-à-dire pour développer la puissance *d'un cheval pendant* une heure?

Solution : $x = 470$ gr.

12° Un amateur qui dispose de 20 éléments Poggendorff ($E = 2^v, 01$) désire savoir combien il pourra alimenter de lampes à incandescence de 10 bougies, 40 volts, 0,6 ampères et 32 ohms de résistance à chaud.

Solution : $x = 7$ lampes.

13° Le courant de 4 éléments Daniell, de résistance intérieure $r = 1,5$ ohms, montés en série, traverse un bain de galvanoplastie contenant du sulfate de cuivre de résistance spécifique 19,10 : les électrodes, qui sont en platine, ont 1500 cmq de surface et elles sont écartées de 3 cm ; calculer le poids du dépôt formé en 5 minutes.

Solution : $x = 0,0495$ gr.

14° Calculer le champ produit en son centre par un courant circulaire d'intensité I et de rayon R.

L'action de chaque élément Δs a pour valeur sur un pôle + I placé au centre

$$\frac{I.\ \Delta s}{R^2}.$$

Les actions étant normales au plan du cercle, on a, pour l'action totale,

$$\frac{I}{R^2}\ \Sigma \Delta s.$$

Or $\Sigma \Delta s$ est la longueur $2\pi R$ de la circonférence ; donc le champ au centre

$$H_1 = \frac{2\pi I}{R}.$$

15° Un conducteur en cuivre de 100 km de longueur ne doit pas avoir une résistance supérieure à 50 ohms ; quels seront son diamètre et sa section ?

Solution : $x = 0,63$ cm.
$y = 0,3168$ cm².

16° Un coupe-circuit de sûreté, en métal fusible, doit interrompre le courant dès qu'il atteint 20 ampères ; quel diamètre lui donnera-t-on ? Les coupe-circuits sont des fils de plomb dont la section se calcule à raison de 0,127 mm² par ampère.

Solution : $x = \sqrt[3]{\frac{I^2}{K^2}}$.

17° On veut transmettre 100 chevaux à 0,5 km de distance ; la génératrice dont on dispose a une force électromotrice de 2000 volts ; on demande de calculer tous les éléments de la transmission dans les conditions les plus avantageuses, sachant que la génératrice a 12 ohms de résistance, et que la réceptrice est identique à la génératrice.

Solution : Puissance transportée $x = 36$ chevaux [1].

18° Deux cerceaux ont leurs centres en coïncidence et leurs plans perpendiculaires. Ils sont parcourus par des courants sinusoïdaux de même période. On demande :

1° De calculer le champ résultant au centre.

2° D'indiquer comment varie ce champ (champ magnétique tournant).

1. Voir A. Witz : Exercices *de physique et applications*.

TABLEAUX DE NOMBRES

UTILES POUR LA RÉSOLUTION DES PROBLÈMES[1].

Valeurs de l'accélération et de la longueur du pendule.

LIEUX	LATITUDE	g	l
Équateur	0°,0'	978,10	99,103
Constantinople	41,00	980,15	99,319
Latitude 45°	45,00	980,61	99,356
Paris	48,50	980,99	99,390
Greenwich	51,29	981,17	99,413
Berlin	52,30	981,25	99,422
Édimbourg	55,37	981,54	99,451
Aberdeen	57,90	981,64	99,466
Pôle	90,00	983,11	99,610

Densités des gaz et des vapeurs à 0° C et à la pression de 10^6 dynes par cm² (1 barie).

GAZ	DENSITÉ EN GRAMMES par dm³	VOLUME DE 1 GRAMME en cm³	MASSE RELATIVE à celle de l'air
Air	1,2579	783,8	1,00
Oxygène	1,4107	708,9	1,11
Azote	1,2393	806,9	0,97
Hydrogène	0,08837	11 316,0	0,069
Acide carbonique	1,9509	512,6	1,52
Oxyde de carbone	1,2179	821,1	0,97
Gaz des marais	0,7173	1 394,1	0,57
Chlore	3,0909	323,5	2,43
Protoxyde d'azote	1,9433	514,6	1,53
Bioxyde d'azote	1,3254	754,5	1,04
Acide sulfureux	2,6990	370,5	2,21
Cyanogène	2,2990	435,0	1,81
Gaz oléfiant	1,2529	789,1	0,99
Ammoniaque	0,7594	1 316,8	0,60
Vapeur d'eau	0,0800	»	0,62

1. *Voir Hospitalier, Formulaire de l'Électricien*, année 1893.

Densités en grammes-masse par centimètre cube à 0° C.

MÉTAUX.		
Iridium	22	58
Platine	21 à	22
Or	19 à	19,6
Plomb		11,4
Argent		10,5
Cuivre martelé		8,9
— laminé		8,8
— fondu		8,6
Maillechort	8,5 à	8,62
Laiton fondu	7,8 à	8,4
— en fils		8,54
Acier	7,8 à	7,9
Fer		7,8
Étain	7,5 à	7,5
Zinc		7,19
Fonte		7,0
Aluminium laminé		2,67
BOIS.		
Chêne	0,61 à	1,17
Ébène	1,12 à	1,21
Écorce de liège		0,24
Peuplier	0,39 à	0,51
Buis de France	0,91 à	0,95
— de Hollande		1,35
ISOLANTS.		
Flint	3,0 à	3,5

ISOLANTS (suite).		
Crown		2,5
Verre vert		2,6
Ardoise		2,8
Marbre		2,7
Porcelaine	2,15 à	2,3
Ivoire		1,8
Goudron		1,0
Gutta-percha	0,97 à	0,9
Caoutchouc		0,9
Ébonite		1,1
Cire		0,9
Paraffine		0,8
LIQUIDES.		
Mercure		13,59
Eau de mer		1,02
Huile d'olive		0,91
Alcool pur		0,79
Éther		0,71
SUBSTANCES DIVERSES.		
Charbon Carré		1,6
— de cornue		1,9
Diamant		3,50
Coke	1,0 à	1,6
Glace		0,92
Neige non tassée		0,10

Coefficients de dilatation linéaire de quelques solides pour 1° entre 0° et 10

CORPS	COEFFICIENTS	CORPS	COEFFICIENTS
	0,0000	Fer en fil	1400
Acier	11500	Fonte	1110
— trempé	12250	Glace de — 27 à — 1	5185
Aluminium	22239	Marbre blanc	1079
Argent	19097	— noir	0129
Bois de sapin	03520	Or	1456
Briques	05502	Platine	0882
Bronze	18492	Plomb	2848
Cuivre jaune (laiton)	18782	Verre en tubes	[illegible]
— rouge	17182	— en verges pleines	[illegible]
Étain	21750	— en flint	[illegible]
Fer	11821	Zinc	[illegible]

Formule exacte pour la réduction des hauteurs barométriques à 0°.

$$h = H \cdot \frac{5550}{5550 + \theta}(1 + K\theta).$$

h, hauteur réduite; H, hauteur observée; θ, température de l'expérience; K, coefficient de dilatation linéaire de l'échelle.

Pour le laiton . . . . . K = 0,0000188 par degré C.
Pour le cristal . . . . . K = 0,0000076 —

Points de fusion et d'ébullition des corps usuels.

(Les points d'ébullition sont établis sous la pression de 76 centimètres.)

SUBSTANCES	FUSION	ÉBULLITION
Acide carbonique	»	— 78°
— stéarique	70°	»
— sulfureux	— 79,2	— 10
Acier doux	1450	»
— dur	1400	»
— au manganèse	1260	»
Alcool absolu	< — 90	78,3
Aluminium	625	»
Argent	945	»
Benzine	7	80,8
Beurre	30	»
Bronze	900	»
Chlorure de sodium (dissolution saturée)	»	108,0
Cire jaune	76,2	»
— blanche	68,7	»
Cuivre	1054	»
Eau de mer	— 2,5	103,7
Essence de térébenthine	— 10	156,8
Éther sulfurique	— 32	35,5
Fer	1500 à 1600	»
Fonte de fer	1050 à 1200	»
— grise	1220	»
— blanche	1135	»
Huile de lin	— 20	387,5
Mercure	— 39,5	358,0
Naphtalène	»	218,0
Or à 900/1000	1180	»
Paraffine	45,7	370,0
Phosphore	44,2	290,0
Platine	1775	»
Palladium	1500	»
Plomb	326	»
Soufre	114,5	448,0
Sulfate de potasse	1045	»
Suif	33	»
Sulfure de carbone	»	48,0
Zinc	415	1040,0

Consommation et chaleur dégagée par les principaux illuminants.

ILLUMINANTS	CONSOMMATION HORAIRE par bec carcel	CHALEUR DÉGAGÉE EN CALORIES (Kg. D) par carcel-heure	VOLUME D'ACIDE CARBONIQUE en litres
Bec bougie à gaz	200 l.	1040	140
Bougie de l'Étoile	70 gr.	700	59
Bec papillon à gaz	127 l.	660	84
Bec de gaz à verre (forte consommation)	90 l.	468	61
Lampe à huile	42 gr.	420	58,5
— à pétrole	39 gr.	390	48
— à incandescence	30 watts-heure	25	0

Chaleurs spécifiques en calories (g.-d.) par gramme

Argent	0,0570	Platine	0,3240
Cuivre	0,0952	Plomb	0,0314
Étain	0,0562	Soufre	0,1776
Fer	0,1138	Zinc	0,0956
Mercure	0,0319	Glace	0,5040
Nickel	0,1092	Eau (Def.)	1,0000
Or	0,0324	Alcool	0,5475

Corps gazeux. (Chaleur spécifique à pression constante.)

Air	0,2374	Ammoniaque	0,5084
Oxygène	0,2175	Acide carbonique	0,2169
Hydrogène	3,4090	— sulfureux	0,1544

Chaleur spécifique de l'air à volume constant 0,17

Chaleur de fusion.

Eau	79,25	Soufre	9,37
Zinc	28,15	Phosphore	5,05
Étain	14,25	Mercure	2,88

Chaleurs de vaporisation, à la pression de 76 centimètres.

Eau	537	Acide acétique	102
Alcool méthylique	264	Éther sulfurique	91
— ordinaire	203	Essence de térébenthine	69

Force élastique de la vapeur d'eau d'après Regnault.

TEMPÉRATURE	FORCE ÉLASTIQUE en mm de mercure	TEMPÉRATURE	FORCE ÉLASTIQUE en mm de mercure	TEMPÉRATURE	FORCE ÉLASTIQUE en mm de mercure
— 30°	0,386	40°	54,906	110°	1 075,37
— 20	0,927	50	91,982	120	1 491,28
— 10	2,093	60	148,791	130	2 030,28
0	4,600	70	233,093	150	3 581,23
10	9,165	80	354,643	200	11 688,96
20	17,391	90	525,450	230	20 926,40
30	31,548	100	760,000	»	»

Force élastique des vapeurs de quelques liquides.

TEMPÉRATURE	ALCOOL	ÉTHER	SULFURE DE CARBONE	CHLOROFORME
	mm	mm	mm	
— 20°	3,34	68,60	47,30	»
+ 10	24,23	286,83	198,46	»
30	78,52	634,80	434,62	217,51
50	219,90	1264,83	857,07	535,05
100	1697,55	4933,30	3325,15	2428,54
150	7318,40	»	9095,94	7280,62
165	»	»	»	9527,82

Résistance des conducteurs les plus usuels à la température de 0° C. en unités légales

NATURE DES CONDUCTEURS	RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE en microhms-centimètres	RÉSISTANCE DE 100 M de 1 millimètre de diamètre	ACCROISSEMENT DE RÉSISTANCE par degré centigrade vers 20° C
Argent recuit	1,492	1,899	0.00377
— écroui	1,620	2.062	0.00385
Cuivre recuit	1,584	2,017	0.00388
— écroui	1,621	2,063	0.00410
Aluminium recuit	2,889	3,679	0.00390
Zinc comprimé	5,580	7,105	0.00365
Platine recuit	8,981	11.435	0.00247
Fer recuit.	9,636	12.270	0.00500
Nickel recuit	12,356	15,730	0.00500
Ferro-nickel recuit.	78,300	99.694	0.00095
Étain comprimé	13,105	16.680	0.00365
Plomb comprimé	19.465	24.780	0.00387
Bismuth comprimé	130.100	165.600	0.00354
Mercure liquide	94.340	120.120	0.00072
Maillechort	20,760	26,430	0.00044

CONSTANTES UTILES

Radiant	57° 17′ 44″.
Valeur du cheval-vapeur en ergs	$7{,}337 \times 10^9$.
Joule	10^7 ergs.
Watt	10^7 ergs par seconde.
Le cheval-vapeur correspond à	736 watts.
La calorie-gramme équivaut à	$4{,}17 \times 10^7$ ergs ou 4,17 joules.
Valeur du rapport v d'après M. Abraham (thèse de doctorat, 1892)	$v = 299{,}2 \times 10^8$ centimèt.-seconde.
On prend souvent, dans les applications numériques	$v = 3 \times 10^{10}$.

Expression d'une même quantité d'énergie W dans les systèmes électrostatiques et électromagnétiques.

$$W = i^2 rt = I^2 Rt = eit = EIt = eq = EQ = e^2 c = E^2 C,$$

d'où l'on tire

$$v = \sqrt{\frac{R}{r}} = \frac{i}{I} = \frac{E}{e} = \frac{q}{Q} = \sqrt{\frac{c}{C}};$$

par conséquent

L'unité électromagnétique	de quantité d'électricité	$= v$	unités électrostatiques.
	de courant	$= v$	
	de force électromotrice	$= \frac{1}{v}$	
	de capacité	$= v^2$	
	de résistance	$= \frac{1}{v^2}$	
	de masse magnétique	$= \frac{1}{v}$	

AVIS

—

Nous engageons les élèves — suivant l'exemple donné par l'Académie Sciences — à employer dans la résolution de leurs problèmes un système notations unique, conforme aux décisions et conventions réitérées du Bur International des Poids et Mesures, du Congrès des Électriciens de Paris (18 du Congrès de Mécanique appliquée (1889), du 2e Congrès des Électriciens Paris (1889), enfin du Congrès des Électriciens de Francfort (1891). Voici d'ap M. Hospitalier (*Formulaire de l'Électricien*, 1895), un tableau de cette notat méthodique et rationnelle qui devrait être exclusivement adoptée dans documents officiels, dans les publications de l'Imprimerie nationale et, général, dans toutes les publications scientifiques.

B.A.	British Association.
C	degré centigrade.
C.G.S.	centimètre-gramme-seconde.
A	accélération.
C	capacité.
E	force électromotrice.
H	intensité de champ magnétique.
I	intensité.
L	longueur.
L_m	coeffic^t d'induction mutuelle.
L_s	coefficient de self-induction.
M	masse.
P	puissance.
Q	quantité d'électricité.
R	résistance.
T	temps.
V	volume.
W	énergie, travail, moment d'un couple.
c	centi.
cm^2	centimètre carré.
cm^3	centimètre cube.
d	déci.
f.é.m.	force électromotrice.
f	franc.
g-d	gramme-degré.
g	gramme.
h	hecto *ou* heure.
kg	kilogramme.
kgm	kilogrammètre.
log	logarithme décimal.
log_e	logarithme népérien.
m	mètre *ou* minute.
m^2	mètre carré.
m^3	mètre cube.
mg	milligramme.
mm	millimètre.
s	seconde.
d	diamètre.
e	base des log. népériens. / différence de potentiel.
f	force.
g	accélération due à la pesanteur.
i	intensité.
k	capacité inductive spécifique.
l	longueur.
m	pôle magnétique.
n	nombre abstrait.
r	résistance intérieure.
s	section.
t	temps.
v	vitesse. / rapport des unités électrostatiques aux unités électro-magnétiques.
α	résistance électrique spécifique.
α, β	angles.
δ	déviation.
ε	élongation.
θ	température.
μ	perméabilité magnétique.
σ	densité électrique.
Φ	Flux de force magnétique.
ω	vitesse angulaire.
$\mathfrak{B}$	induction magnétique spécifique.
$\mathfrak{F}$	force magnéto-motrice.
$\mathfrak{H}$	force magnétisante.
$\mathfrak{I}$	intensité d'aimantation.
$\mathfrak{M}$	moment magnétique.
$\mathfrak{R}$	résistance magnétique.

TABLE DES MATIÈRES

LIVRE I

MATIÈRE, MOUVEMENT ET FORCES

CH. I. — *Notions préliminaires.* 1

Matière, corps, propriétés des corps. — Phénomènes physiques, phénomènes chimiques. 1
Objet de la physique. 2
Méthode physique ou méthode expérimentale. — Lois physiques. 2
Théories physiques. — Anciens fluides impondérables. — Anciens agents physiques. — Physique moderne. 4
Divisions de l'ouvrage. 5

CH. II. — *Propriétés générales de la matière*. 6

États physiques des corps. . . . 6
Classification des propriétés de la matière. 8
Inertie. 8
Étendue. — Impénétrabilité. . . 8
Compressibilité. 9
Divisibilité. 9
Atomes et molécules. 10
Pores moléculaires. — Porosité et perméabilité. 11

CH. III. — NOTIONS DE MÉCANIQUE. — *Définitions fondamentales et principes généraux*. 11

Objet de la mécanique. 11
Divisions de la mécanique rationnelle. 12

Cinématique. 12
Définitions préliminaires. 12
Mouvement uniforme. 13
Mouvement varié. 14
Mouvement rectiligne uniformément varié. 15
Mouvement absolu, mouvement relatif, mouvement apparent. . 16
Composition des mouvements. . 17

Statique. 17

Forces. — Équilibre. — Statique. 17
Mesure des forces. — Dynamomètres. 18
Représentation des forces. . . . 20
Résultante et composantes. . . . 20

Dynamique. 21

Définitions. 21
Principe de l'inertie. 21
Principe du mouvement relatif. . 22
Principe de l'égalité de l'action et de la réaction. 22
Masse. 23
Travail mécanique d'une force constante en grandeur et en direction. 24
Force vive, puissance vive. . . . 25
Théorème du travail ou des forces vives. 26
Transformation du travail en force vive et de la force vive en travail. 26
Énergie actuelle. — Énergie potentielle. — Énergie totale. 27
Principe de la conservation de l'énergie. 29
Unités métriques d'énergie et de puissance. 30

LIVRE II

PESANTEUR

Ch. I. — *Direction et nature de la pesanteur* 55

Définition de la pesanteur. . . . 55
Direction de la pesanteur. — Fil à plomb. 55
Verticale. — Horizontale et horizon. 55
Caractères de la pesanteur. — Définition du poids et du centre de gravité des corps. 56

Ch. II. — *Lois de la chute des corps. — Centre de gravité. — Équilibre des solides pesants.* . 57

Énoncé des lois. 57
Vérification expérimentale des lois. 58
Plan incliné. 40
Machine d'Atwood. 42
Appareil de Morin. 48
Expériences de MM. Cailletet et Colardeau à la tour Eiffel. 50
Centre de gravité des corps homogènes. 53
Centre de gravité des solides géométriques. 54
Centres de gravité des surfaces et des lignes. 55
Équilibre des solides pesants. . . 56
Détermination empirique du centre de gravité des corps solides. 58

Ch. III. — *Détermination de l'intensité de la pesanteur. — Pendule. — Expériences de Borda. — Applications du pendule.* . 59

Détermination de g. 59
Pendule. 59
Lois expérimentales du pendule. 62
Vérification expérimentale des lois du pendule. 63
Comparaison du pendule composé et du pendule simple. 65
Formule du pendule composé. — Longueur du pendule composé, longueur du pendule simple synchrone. 66
Cinquième loi du pendule. Loi des intensités. 68
Longueur du pendule simple synchrone : autre formule. 69
Théorème d'Huygens : Réciprocité de l'axe d'oscillation et de l'axe de suspension. — Pendules réversibles. 70
Application du pendule à la mesure de g. 71
Expériences de Borda. 72
Expériences du commandant Defforges. — Pendule réversible et à couteaux échangeables. . . . 77
Résultats des diverses mesures de g à Paris. 79
Variations de g et de L à la surface du globe. 79
Variations de g à l'intérieur du globe. 79
Origine de la pesanteur. 80
Applications du pendule composé. 81

Ch. IV. — *Mesure des grandeurs mécaniques et physiques. — Système des unités absolues ou système C. G. S. — Instruments de précision* 84

Définitions générales. 84
Avantages généraux d'un système de mesures rationnelles. . . . 85
Insuffisance du système métrique. Nécessité d'un système de mesures absolues : système de Gauss et système C. G. S. . . . 86
Exposé du système C. G. S. . . . 88
Conversion des mesures rationnelles en mesures absolues : dimensions et équations de dimensions. 90
Dimensions et équations des dimensions des principales unités mécaniques dérivées. 91

Mesure des grandeurs fondamentales 92

Généralités sur les mesures et les instruments de précision. . . . 92
Règles divisées. — Mètre-étalon. . 93
Vernier. 94
Vis micrométrique. 96

Sphéromètre. 97
Application de la vis micrométrique : appareil de Borda. . . . 99
Machine à diviser. 100
Cathétomètre. 101
Micromètre oculaire. 103
Comparateur. 104
Mesure des masses, des poids et des forces. 106
Définitions et généralités. 106
Balances. 107
Balances de précision. 113
Balance de Collot. 114
Différentes méthodes de pesée. . . 117

LIVRE III

HYDROSTATIQUE

CH. I. — *Caractères généraux des liquides*. 121
Hydrostatique et hydrodynamique. 121
Compressibilité des liquides. . . 121
Principe d'égalité de pression ou principe de Pascal. 121
Généralisation du principe de Pascal. 122
Direction des pressions. 123
Presse hydraulique. 124
Presses de Desgoffe et de Cailletet. 126

CH. II. — PROPRIÉTÉS DES LIQUIDES PESANTS EN ÉQUILIBRE. — *Pressions sur les parois des vases. — Pressions sur les corps immergés. — Conditions d'équilibre des liquides pesants*. . . . 127
Existence des pressions dans les liquides pesants en équilibre. . 127
Théorème fondamental. 128
Conditions d'équilibre d'un liquide pesant. 130
Pressions sur les parois des vases. 130
Pressions sur le fond plan et horizontal d'un vase. 130
Vérification expérimentale. . . . 131
Pressions sur une paroi plane latérale. 133
Centre de pression. 134
Pressions sur l'ensemble des parois d'un vase. 135
Paradoxe hydrostatique. 137
Vases à réaction. 137
Pressions sur les corps immergés. 139
Principe d'Archimède. 139
Réciproque du principe d'Archimède. 141
Vérification simple du principe d'Archimède : dispositif de M. Boudréaux. 142
Détermination du volume d'un corps. 142
Équilibre des corps immergés et des corps flottants. 143
Conditions d'équilibre des corps flottants. — Métacentre. 144
Ludion. 145
Natation. 146
Conditions d'équilibre des liquides pesants. 146
Équilibre d'un liquide dans un seul vase. 146
Équilibre d'un seul liquide dans un système de vases communicants. 147
Équilibre des liquides superposés. 148
Équilibre de deux liquides hétérogènes dans deux vases communicants. 150

CH. III. — APPLICATIONS DES PRINCIPES D'HYDROSTATIQUE. — *Détermination des densités et poids spécifiques. — Aréomètres. — Applications diverses*. 152
Détermination des densités. . . . 152
Définitions générales. 152
Détermination des densités ou poids spécifiques. 155
Densité des solides. 157
Cas particuliers de la densité des solides. 160
Densité des liquides. 160
Aréomètres. 163
Différents types d'aréomètres. . . 163
Aréomètres de Baumé. 165

Aréomètre de Cartier. 165
Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac. 165
Extension de la graduation centésimale aux pèse-sels, pèse-lait, pèse-vins, pèse-urine. 167
Graduation par comparaison. . . 167
Densimètres et volumètres. . . . 169
Applications diverses. 170
Niveau d'eau. 170
Niveau à bulle d'air. 171
Cours d'eau. — Jets d'eau. — Puits artésiens. 171

LIVRE IV

PNEUMATIQUE

Ch. I. — Statique des gaz. — *Pression atmosphérique et baromètres*. 177
Caractères physiques et propriétés des gaz. 177
Statique des gaz. 180
Étude de la pression atmosphérique. 181
Mesure de la pression atmosphérique : expérience de Torricelli. 182
Vérifications de Pascal. 184
Valeur de la pression atmosphérique en kilogrammes. 184
Classification des baromètres. . . 185
Baromètre à cuvette. 185
Baromètre à niveau invariable. . 186
Baromètre de Fortin. 187
Baromètres à siphon. 190
Baromètre normal. 192
Dispositif de M. A. Leduc. 192
Baromètres du Bureau international des poids et mesures. . . . 193
Corrections barométriques. . . . 194
Construction des baromètres. . . 196
Prévision du temps par le baromètre. 198
Baromètre à cadran. 199
Mesure des altitudes par le baromètre ou nivellement barométrique. 200
Baromètres métalliques ou anéroïdes. 201

Ch. II. — Statique des gaz. — *Principe d'Archimède et aérostats*. . 204
Extension du principe d'Archimède au cas des gaz. 204
Expérience du baroscope. 204
Conséquences du principe d'Archimède : Poids réels et poids apparents. — Correction des pesées faites dans l'air. . . . 206
Conséquences du principe d'Archimède : Équilibre des corps immergés dans l'atmosphère. . . 208
Aérostats : montgolfières et ballons. 207
Théorie des aérostats. — Force ascensionnelle. 210
Parachute. 213
Navigation aérienne ou direction des ballons. 215
Ballons montés et ballons non montés. — Sondes aériennes Renard. 217

Ch. III. — Compressibilité des gaz. *Loi de Mariotte. — Cas général de la compressibilité. — Manomètres*. 218
Loi de Mariotte. 218
Expressions analytiques de la loi de Mariotte. 221
Étude critique de la loi de Mariotte. — Expériences antérieures à celles de Regnault. . . 221
Expériences de Regnault. . . . 222
Expériences postérieures à celles de Regnault. 225
Compressibilité aux diverses températures. 228
Manomètres. 230
Définitions. 230
Manomètre à air libre ordinaire. . 231
Petit manomètre à air libre. . . 233
Manomètre barométrique ou baromètre différentiel de Regnault. 235
Grand manomètre à air libre de la tour Eiffel. 234

Manomètre à liquides moins denses que le mercure. 234
Manomètre dit de Desgoffe. . . . 234
Manomètre à pistons libres et à liquides visqueux de M. Amagat. 235
Manomètres à air comprimé. . . 236
Manomètres à gaz comprimés pour les fortes pressions. 237
Manomètres métalliques. — Manomètre de Bourdon. 237
Manomètres de M. Cailletet. . . . 239
Voluménomètre. 240

Ch. IV. — Expansibilité des gaz. — *Diffusion et Dissolution*. 241

Mélange des gaz ou diffusion . . . 241
Lois du mélange des gaz 242
Dissolution ou absorption des gaz par les liquides 243
Étude expérimentale de la solubilité. 243

Ch. V. — Applications de l'expansibilité des gaz. — *Machines pneumatiques* 245

Machine pneumatique ordinaire. . 245
Limite du vide. 252
Robinet de Babinet ou robinet à double épuisement 253
Usages de la machine pneumatique. Expériences classiques. . 255
Machine pneumatique de Bianchi. 256
Machine pneumatique de Deleuil. 258
Pompe pneumatique de E. Carré. 259

Machines pneumatiques à mercure. 260

Principe et généralités. 260
Machine d'Alvergniat (modèle primitif) 261
Machine d'Alvergniat (nouveaux modèles) 261

Ch. VI. — Applications de l'élasticité des gaz. — *Pompes de compression. — Trompes soufflantes et aspirantes. — Applications de l'air comprimé*. 263

Machines de compression. 263
Pompe à main. 263
Machine de compression de Regnault. 265
Pompe Cailletet 266
Théorie des machines de compression. 267
Limite de la condensation 268

Trompes aspirantes et soufflantes. 269

Définitions. — Principe 269
Petite trompe à eau d'Alvergniat . 270
Aspirateur de Sprengel : pompe-trompe d'Alvergniat 270
Aspirateur ordinaire de Sprengel . 272
Machine soufflante ou trompe à eau 272
Applications de l'air comprimé et de l'air raréfié. 272
Fusil à vent 273
Poste pneumatique. 274
Horloges pneumatiques. 275
Freins automoteurs. — Freins Westinghouse 276
Chemins de fer atmosphériques. . 276
Moteurs à air comprimé 276
Machines perforatrices. 277
Travaux sous-marins : cloche à plongeur, appareil Triger, scaphandre. 278

LIVRE V

COMPLÉMENTS : NOTIONS D'HYDRODYNAMIQUE COMPRESSIBILITÉ DES LIQUIDES. — NOTIONS DE CAPILLARITÉ

Ch. I. — Notions d'hydrodynamique. — *Principe de Torricelli et applications. — Pompes et siphons*. 281

Principe de Torricelli : Énoncé et formule. 281
Démonstration du principe 282
Vérification expérimentale de la formule de Torricelli 282
Vase de Mariotte. 284
Écoulement d'un liquide en contact avec une masse d'air limitée. 285
Pipette 286
Fontaine intermittente. 287

Pompes. 288
Pompes aspirantes. 289
Pompe aspirante et élévatoire. . . 291
Effort et travail nécessaires pour manœuvrer la pompe aspirante. 291
Pompe aspirante à volant. 292
Pompes foulantes 292
Pompes aspirantes et foulantes . . 293
Pompes oscillantes. — Pompe de Bramah 293
Pompes à jet continu. 294
Machines élévatoires ou machines d'épuisement 295
Fontaine de Héron. 296
Machine de Schemnitz 297
Siphons. 298
Théorie complète du siphon. . . 299
Siphon à écoulement constant. . 300
Siphon intermittent ou vase de Tantale 301
Fontaines intermittentes naturelles. 302

Ch. II. — *Compressibilité des liquides.* 302

Coefficient de compressibilité. . 302
Piézomètre et expériences d'Œrsted. 303
Lois de la compressibilité des liquides 304

Ch. III. — *Notions de capillarité.* 306

Phénomènes capillaires : définitions 306

I. *Phénomènes produits au contact des solides par les liquides qui les mouillent.* 308

Lois de l'ascension des liquides dans les tubes capillaires. . . . 308
Loi de l'ascension des liquides entre deux lames parallèles. 309
Loi de l'ascension des liquides entre deux lames inclinées. . . 309
Vérification des lois. — Expériences de Gay-Lussac. 309
Expériences d'Édouard Bessins . 310
Influence de la température. — Expériences de M. Wolf. 310
Tension superficielle. — Constante capillaire 311
Origine de la tension superficielle. — Cohésion des liquides. — État de la couche superficielle. . . 312
Conséquences de la tension superficielle. — Pression capillaire. — Formule de Laplace. 313
Vérification de la formule de Laplace. — Expériences de Plateau. 314

II. *Phénomènes produits au contact des corps solides par les liquides qui ne les mouillent pas.* 316

Contact des liquides et des solides. — Angle de raccordement . . 316
Étude expérimentale de l'angle de raccordement. 319
Lois de la dépression des liquides dans les tubes capillaires, et entre les lames parallèles 316
Conséquences relatives à la correction barométrique. — Construction des tables de correction. 317

III. *Phénomènes capillaires divers. — Applications.* 318

Longueur de la colonne liquide suspendue dans un tube ouvert. 318
Formation des gouttes à un orifice capillaire. — Loi de Tate. — Théorie du compte-gouttes. . . 319
Exception aux lois de l'équilibre des corps flottants. 320
Mouvement des gouttes dans les tubes capillaires coniques . . . 320
Attractions et répulsions des corps flottants. 321
Expérience de M. Lippman. — Phénomènes électrocapillaires . 321
Applications de la capillarité aux aréomètres 322

LIVRE VI

ACOUSTIQUE

Ch. I. — Production, propagation et réflexion du son. 325
Objet de l'acoustique. — Sons et bruits. 325

Cause du son 325
Le son ne se propage pas dans le vide. 326
Le son se propage dans tous les corps élastiques. 327
Vitesse du son dans les gaz. . . . 327
Calcul de la vitesse du son dans les gaz. — Formule de Newton. — Correction de Laplace. . . . 329
Vitesse du son dans les liquides et les solides. 329
Mode de propagation du son dans l'air : Idée synthétique du phénomène. 330
Propagation du son dans l'air : Analyse du phénomène. 332
Réflexion du son. 334
Échos et résonnances 335
Réfraction du son 338
Circonstances qui font varier l'intensité du son. 338
Renforcement du son par les tuyaux. 339
Speaking-tubes. 339
Porte-voix. 339
Cornet acoustique 340
Audiphone. 341
Stéthoscope. 341

Ch. II. — Hauteur du son. — *Mesure du nombre des vibrations.* 342

Qualités du son musical 342
Méthodes diverses pour mesurer le nombre des vibrations 343
Méthode acoustique. — Sirène de Cagniard de Latour. 343
Sirène de Seebeck 345
Soufflerie 346
Roue dentée de Savart. 346
Limite des sons perceptibles . . . 347
Méthode graphique. — Vibroscope de Duhamel. 348
Phonautographe. 350
Phonographe 350
Phonographe perfectionné 351
Graphophone 352

Classement des sons musicaux. — Théorie de la gamme 353

Classement des sons. — Intervalles musicaux 353
Accords : accords consonants et dissonants. — Accords parfaits. 355
Harmoniques. 355
Échelle musicale. — Gamme. . . 356
Intervalles successifs des notes : Tons et demi-tons. 357
Gamme naturelle. — Transposition musicale. — Dièses et bémols . 357
Gammes mineures. — Tons relatifs. 359
Gamme tempérée. — Tempérament 360
Diapason. 361
Notation des diverses gammes naturelles. — Nombres absolus de vibrations. 362
Limites de l'échelle musicale. . . 362

Ch. III. — *Vibrations des cordes.* 363

Cordes vibrantes. — Définitions. . 363
Sonomètre. 363
Lois des vibrations transversales. 364
Nœuds et lignes nodales. — Sons harmoniques des cordes 365
Vibrations longitudinales des cordes. 366

Ch. IV. — *Vibrations de l'air dans les tuyaux sonores.* 367

Tuyaux sonores : Définitions. . . 367
Tuyaux à bouche : Description et jeu 367
Tuyaux à anche : Description et jeu 368
Lois expérimentales des tuyaux sonores. 369
Nœuds et ventres de vibration. . . 370
Formules des tuyaux sonores. . . 372
Principe des interférences 373
Application du principe des interférences aux ondes sonores. . . 374
Théorie des tuyaux sonores. . . . 375
Battements 376

Ch. V. — *Analyse et synthèse des sons. — Timbre. — Perception des sons.* 377

Analyse des sons. — Méthode de M. Helmholtz : Résonance et résonateurs 377
Résonateurs et appareil analyseur de Kœnig 378
Résultats généraux. — Cause du timbre. 380
Synthèse des sons. 381

Perception des sons 381

Description de l'oreille. 381
Mécanisme de l'audition 385

LIVRE VII

OPTIQUE

Ch. I. — *Propagation de la lumière*. 385

Définitions générales. 385
Optique géométrique. — Optique physique. 386
Direction de la propagation . . . 386
Loi de la propagation rectiligne. . 386
Théorie géométrique des ombres. 387
Applications. 389
Images données par les petites ouvertures. 390
Vitesse de propagation. 391
Vitesse de la lumière. — Historique et résultats 391
Méthode de Rœmer. 391
Expériences de M. Fizeau. 393

Intensité de la lumière transmise. — Photométrie 394

Définitions. 394
Méthode photométrique. — Photomètres 395
Photomètre de Rumford. 395
Photomètre de Bunsen. 396
Procédé photométrique de M. Crova. 397
Éclat intrinsèque des foyers de lumière. 397

Ch. II. — Catoptrique. — *Réflexion spéculaire et miroirs plans*. . . 398

Réflexion spéculaire. — Définitions et lois. 398
Réflexion irrégulière ou diffusion. 400
Pouvoirs réflecteurs et diffusifs. . 400
Miroirs 400
Formation des images par les miroirs plans. 401
Champ d'un miroir plan. 402
Images virtuelles et images réelles. 403
Miroirs étamés. — Images multiples. 403
Images multiples données par deux miroirs inclinés. 404
Kaléidoscope. 405
Images multiples données par deux miroirs parallèles. 406
Problème du miroir tournant . . 406
Applications des miroirs. 407

Miroirs courbes. 407

Miroirs sphériques. — Définitions. 407
Miroirs concaves. — Étude géométrique et expérimentale (cas des rayons centraux). 408
Définition des foyers. 408
Foyer principal. — Définition et détermination. 410
Cas des points lumineux. — Foyers conjugués. 410
Cas d'objets lumineux : Construction des images. 412
Miroirs convexes. — Étude géométrique et expérimentale (cas des rayons centraux). 415
Formules des miroirs sphériques concaves de petite ouverture. . 417
Discussion de la formule des miroirs concaves. 419
Formules des miroirs convexes de petite ouverture. 420
Cas des objets lumineux. . . . 420
Cas des miroirs de grande ouverture. — Rayons marginaux ; aberration de sphéricité ; caustiques par réflexion. 421
Miroirs paraboliques 423
Construction et emploi des miroirs aplanétiques. 424

Ch. III. — Dioptrique. — *Lois de la réfraction simple* 424

Définitions. 424
Lois de la réfraction simple . . . 425
Indice de réfraction, indice inverse 425
Phénomènes dus à la réfraction . . 425
Angle limite. — Phénomène de la réflexion totale 426
Mirage. — Explication de Monge. 427

Transmission par les milieux réfringents. — Lames et prismes. 428

Lames à faces parallèles 428
Mesure des indices de réfraction : Méthode du duc de Chaulnes. . 430
Prismes. 431
Formules du prisme. 432
Étude expérimentale de la déviation. 433

Condition expérimentale de la déviation minimum 455
Condition d'émergence dans les prismes 456
Prismes à réflexion totale. 456
Foyers d'un prisme. 457
Mesure des indices. 458

Transmission par les milieux réfringents. — Lentilles 441
Définitions. 441
Analogie physique d'une lentille et d'un prisme. 441
Lentilles minces convergentes : Étude géométrique et expérimentale. 442
Foyers : définition et détermination. 442
Centre optique. 446
Axes secondaires. — Foyers conjugués secondaires. 447
Détermination expérimentale des foyers. 447
Construction des images. 448
Lentilles minces divergentes : Étude géométrique et expérimentale. 449
Discussion algébrique de l'équation aux foyers conjugués. 451
Aberration de sphéricité. 452
Aplanétisme. 453
Lentilles à échelons. 453
Aberrations dues à l'épaisseur des lentilles. 454
Notions sur les lentilles épaisses. — Théorie des rayons centraux. 454
Points nodaux. 457
Plans principaux. 458

Ch. IV. — Chromatique. — *Dispersion et achromatisme.* — Analyse spectrale 460
Décomposition de la lumière blanche. — Spectre solaire. 460
Production d'un spectre pur. — Règle de Newton. 461
Les couleurs du spectre sont simples et inégalement réfrangibles. 462
Recomposition de la lumière blanche. 463
Composition de la lumière et couleur des corps. Théorie de Newton 465
Couleurs complémentaires 466
Constitution du spectre solaire : *Spectre lumineux, calorifique et chimique* 466
Spectre lumineux : Pouvoir lumineux des divers faisceaux du spectre. — Expérience de Draper. 467
Spectre calorifique. 467
Aberration de réfrangibilité. . . . 467
Effet d'aberration de réfrangibilité : Irisation des objets vus au travers d'un prisme. 468
Achromatisme. 468
Théorie de l'achromatisme (rayons centraux) 468
Absorption de la lumière par les milieux transparents. 470

Raies du spectre et analyse spectrale 470
Raies du spectre. 470
Spectroscopes 471
Spectroscope ordinaire. 473
Spectroscopes à vision directe. . . 474
Applications de spectroscope. — Analyse spectrale. 474
Découvertes principales de l'analyse spectrale 475
Résumé de spectroscopie. — Spectres de divers ordres. 476

Ch. V. — *Instruments d'optique.* . 478
Loupe ou microscope simple. . . 478
Correction des aberrations. — Doublets 480
Microscope simple. 481
Microscope composé 481
Mesure expérimentale du grossissement 482
Description du microscope Nachet. 484
Achromatisme du microscope. . . 486
Champ. — Diaphragme. — Point oculaire 487

Instruments d'optique astronomiques. 488
Lunettes ou réfracteurs. — Télescopes ou réflecteurs 488
Réfracteur ou lunette dite astronomique. 488
Mesure expérimentale du grossissement. 492
Méthode de Ramsden. 492
Clarté dans les lunettes. 492
Instruments méridiens et équatoriaux 494
Équatorial coudé. 497
Lunette terrestre. 497
Lunette de Galilée 499

Applications scientifiques des lunettes terrestres : Réglage du cathétomètre 500
Télescope de Newton. 502
Télescope de Foucault 503

Instruments ou appareils de projection. 505
Lanterne magique. 505
Microscope solaire 506
Lanternes de projection. 508
Polyoramas ou appareils à vues fondantes 509

Ch. VI. — *Vision*. 511

Structure de l'œil humain 511
Marche des rayons dans l'œil. . . 514
Ligne visuelle. — Angle des lignes visuelles. — Angle visuel. . . . 515
Appréciation de la distance et de la grandeur des objets 516
Vue simple avec les deux yeux . . 516
Cause du relief apparent des corps. — Stéréoscope. 517
Région insensible de la rétine : Punctum cæcum. 518
Persistance de l'impression sur la rétine 518
Contraste des couleurs. — Loi de Chevreul. 518
Distance de la vision distincte. . . 519
Accommodation 519
Vue normale. — Œil emmétrope. 520
Presbytie. — Besicles ou lunettes à verres convexes 520
Myopie. — Besicles ou lunettes à verres concaves 521
Hypermétropie. 522
Astigmatisme. 523
Diplopie. 523
Achromatopsie ou daltonisme. . . 524
Ophtalmoscope. 524

Ch. VII. — Notions d'optique physique. — *Double réfraction*. — *Interférences*. — *Polarisation*. 525

Double réfraction 525
Définitions. — Préliminaires . . . 525
Loi de Brewster. — Cristaux à un axe 526
Rayon ordinaire et rayon extraordinaire 527
Cristaux positifs et cristaux négatifs. 528
Lois de la double réfraction dans les cristaux à un axe. 528
Construction des rayons réfractés : Règle d'Huygens 529
Lois de la double réfraction dans les cristaux à deux axes. . . . 530

Interférences 530
Principe des interférences. — Expérience des miroirs de Fresnel. 530
Explication des franges de Fresnel. — Confirmation de l'hypothèse des ondulations 532
Nécessité de l'existence de l'éther. 533
Origine des couleurs du spectre. . 535
Valeurs numériques des longueurs d'onde et des vibrations lumineuses. 534
Autres phénomènes d'interférence : Anneaux de Newton 534
Autres phénomènes d'interférence : Diffraction et réseaux. 535

Polarisation. 536
Définition expérimentale de la polarisation 537
Cause de la polarisation : Vibrations transversales de l'éther. . . . 538
Lois de Malus 539
Conséquences de la loi de Malus. — Vérification expérimentale . . 539
Divers procédés de polarisation de la lumière. 540
Interférence des rayons polarisés. 542
Appareils de polarisation 542
Appareil de Norremberg 543

Polarisation rotatoire 544
Rotation du plan de polarisation. . 544
Coloration produite par la polarisation rotatoire. 544
Pouvoir rotatoire des liquides. — Expériences de Biot 544
Applications de la polarisation rotatoire. 546
Saccharimétrie et saccharimètres : Principe et méthode, organes essentiels 546
Saccharimètre de Soleil 548
Saccharimètre à pénombres . . . 549
Analyse de l'urine des diabétiques. 551

Ch. VIII. *Photographie* 551

Définition. — Historique 551
Daguerréotypie. 552
Découvertes postérieures à la daguerréotypie. 554

Classification des divers procédés photographiques 554
Photographie au collodion humide. 555
Procédé au gélatino-bromure d'argent. 556
Opérations accessoires. — Retouche du négatif. 559
Remplacement du verre comme support de la couche sensible. — Plaques pelliculaires et pellicules 559
Matériel et manipulations photographiques. 560
Observations générales sur le procédé au gélatino-bromure d'argent. 565
Tirages des positifs sur papier : épreuves photographiques . . . 565
Procédés photographiques : procédé au chlorure d'argent . . . 566
Autres procédés photographiques. 567
Procédés mécaniques. 568
Photographie instantanée. 569
Photochronographie 570
Autres résultats obtenus par l'emploi des poses très courtes . . . 572
Agrandissements photographiques. 573
Photographie à la lumière artificielle 574
Dégradés photographiques 574
Photographie micrographique. . . 574

Photographie orthochromatique et héliochromie. 576
La photographie orthochromatique. — Les plaques isochromatiques. 576
Photographie orthochromatique : la méthode de M. Lippmann. . . 576
Photographie des couleurs 576
Photographie des couleurs : découverte de M. G. Lippmann. . . . 577
Vérification expérimentale de la théorie 580

LIVRE VIII

CHALEUR

Ch. I. — *Effets généraux. — Thermométrie* 581
Définition et origine de la chaleur. — Hypothèse des ondulations. . 581
Effets généraux : changements d'état 583

Notions élémentaires de thermométrie. 584
Température : définitions. 584
Choix des substances thermométriques 585
Thermomètre à mercure. 585
Graduation du thermomètre : points fixes de l'échelle 587
Différentes échelles thermométriques. 591
Déplacement du zéro. 592
Conditions de sensibilité 593
Thermomètre à alcool 593
Thermomètres à liquides incongelables 594
Thermomètre métallique de Breguet. 595
Thermomètres à maxima et à *minima* 595
Thermomètres de Rutherford. . . 595
Thermomètre à maxima de Walferdin, ou thermomètre à déversement 596
Thermomètre à maxima et à minima de Miller-Casella 597
Thermomètre à renversement. — Type Negretti et Zambra. — Perfectionnement de M. Chabaud. . 597
Pyromètres 599
Thermomultiplicateur 601

Ch. II. — *Dilatation des solides*. . 602
Définitions préliminaires. — Coefficients de dilatation 602
Formules relatives aux dilatations des solides. 603
Mesure des coefficients de dilatation linéaire. — Expériences de Lavoisier et Laplace. 604
Méthode du comparateur 605
Résultats généraux relatifs à la dilatation des solides. 606
Dilatation des cristaux 607
Applications de la dilatation des solides. — Pendules compensateurs 608

Compensateur Graham. 609
Lames compensatrices. — Compensateur Martin. 610

Ch. III. — *Dilatation des liquides*. 611

Définitions préliminaires. 611
Dilatation absolue du mercure : Expériences de Dulong et Petit. 612
Coefficient de dilatation apparente du mercure : Expériences de Dulong et Petit. 614
Thermomètre à poids. 615
Coefficient de dilatation du verre. 615
Coefficients de dilatation des divers liquides 616
Maximum de densité de l'eau. . . 617
Déplacement du maximum de densité par la pression. — Expériences de M. Amagat. 618
Maximum de densité des solutions salines. 618
Application du thermomètre à poids à la mesure des dilatations cubiques. 618

Ch. IV. — *Dilatation des gaz* . . . 619

Expériences de Gay-Lussac 619
Formules générales relatives à la dilatation des gaz 622
Expériences de Regnault : Généralités et résultats 623
Dilatation des gaz sous pression constante 625
Dilatation des gaz à volume constant. 627
Dilatation des gaz à volume et sous pression variables. 629
Expériences de M. Amagat : Lois générales 631

Ch. V. — *Applications de la dilatation des gaz*. 632

Thermomètres à gaz. — Thermométrie de précision. — Densités des gaz 632
Défaut de comparabilité des différents thermomètres 632
Choix de la substance thermométrique. 633
Principes de la thermométrie de précision 635
Thermomètres à mercure. 635
Comparaison du thermomètre à air normal avec le thermomètre à mercure normal 635

Densité des gaz 636
Définition. — Méthode générale de détermination 636
Méthode de Regnault. 636
Densité des gaz qui attaquent le cuivre. 638
Nouvelles expériences de M. A. Leduc 638
Détermination du poids du litre d'air normal. 639

Ch. VI. — *Changement d'état des corps* 640

Fusion et solidification. 640

Lois de la fusion. 640
Chaleur de fusion : travail consommé. 641
Fusion aqueuse ou dissolution. . . 642
Solidification : définition et lois. . 642
Cristallisation 643
Formation de la glace 643
Changements de volume dus aux changements d'état physique. — Force expansive de la glace. . . 645
Exceptions aux lois de la fusion et de la solidification : Influence de la pression extérieure 644
Solidification des liquides par la pression. — Expériences de M. Amagat 646
Regélation de la glace 647
Exceptions aux lois de la solidification : Surfusion 648
Applications de la fusion aqueuse. — Mélanges réfrigérants 649

Ch. VII. — *Vaporisation dans le vide*. 650

Tension maximum des vapeurs. . 650

Définitions. 650
Formation des vapeurs dans le vide 651
Vapeurs saturantes ou saturées. — Tension maximum. 651
Détermination des tensions maxima de la vapeur d'eau au-dessous de zéro. — Expériences de Gay-Lussac. 653
Principe de Watt ou de la paroi froide 654
Détermination des tensions maxima de la vapeur d'eau au-dessus

zéro et 100°. — Expériences de Dalton. 655
Détermination des tensions maxima de la vapeur d'eau entre zéro et 50°. — Expériences de Regnault 655
Détermination des tensions maxima de la vapeur d'eau au-dessus et au-dessous de 100°. — Expériences de Regnault. . . . 656
Tensions maxima des vapeurs de divers liquides. 658
Tensions maxima des dissolutions salines ou acides. 659

B. VIII. — *Changements d'état des corps. — Ébullition et évaporation*. 659

Ébullition. 659

Ébullition : Définition et description du phénomène 659
Lois de l'ébullition. 660
Détermination des points d'ébullition. 662
Influence des substances en dissolution. 662
Influence de la nature des parois des récipients 662
Influence de l'absence d'air ou de gaz dissous. 662
Influence de la pression sur la température d'ébullition. 663
Application : Nivellement hypsométrique ou mesure des altitudes par l'hypsomètre. 664
Application : Marmite de Papin ou digesteur 665
Chaleur de vaporisation. 666
Liquéfaction ou condensation des vapeurs. — Restitution de la chaleur de vaporisation 667
Application de l'ébullition. — Essai des vins par distillation : alambic de Salleron 668

Évaporation. 668

Définition du phénomène. 668
Cas particuliers d'évaporation. . . 668
Circonstances qui accélèrent l'évaporation. 669
Froid dû à l'évaporation 669
Applications du froid produit par l'évaporation. 670
État sphéroïdal ou caléfaction. . 671

Définition et historique. 671
Absence de contact. 671
Forme des gouttes. 672
Température du liquide 673
Température des plaques. 674
Explication de l'état sphéroïdal. . 674

CH. IX. — *Liquéfaction et solidification des gaz et des vapeurs*. . 675

Historique. — Différents procédés. 675
Expériences de M. Cailletet. . . . 677
Expériences de M. Raoul Pictet. . 679
Expérience de MM. Wroblewski et Olszewski 679
Température critique des gaz. — Expériences d'Andrews. 681
Explication du point critique. . . 682
Courbe des densités. 683
Loi des états correspondants . . . 683

CH. X. — *Densités des vapeurs. — Mélange des gaz et des vapeurs*. 684

Densités des vapeurs sèches. — Méthodes de détermination 684
Méthode de Gay-Lussac : Procédé d'Hofmann. 685
Méthode de M. Dumas. 686
Densités des vapeurs saturées. . . 687
Remarque de M. E. Mathias sur les densités et les poids spécifiques des liquides 688

Mélange des gaz et des vapeurs. . 689

Mélange des gaz et des vapeurs. — Lois de Dalton. 689
Formules relatives aux mélanges de gaz et de vapeurs. 691

CH. XI. — *Hygrométrie*. 692

Définitions préliminaires. 692
Hygromètre chimique. 693
Hygromètre à cheveu. 695
Table de graduation de Gay-Lussac. 696
Hygroscopes. 697
Hygromètres à condensation. . . 697
Hygromètre de Daniell. 698
Hygromètre de Regnault. 699
Hygromètre d'Alluard 700
Psychromètre. 701
Formules relatives à l'hygrométrie. 702

CH. XII. — CALORIMÉTRIE. — *Chaleurs spécifiques des corps solides et liquides. — Chaleurs spécifiques des gaz* 705

Définitions préliminaires 705
Chaleurs spécifiques 705
Principes fondamentaux de la calorimétrie 704
Capacité calorifique ou valeur en eau d'un corps 704
Diverses méthodes calorimétriques 705
Méthode des mélanges. — Calorimètre à eau 705
Critique de la méthode des mélanges. — Corrections usuelles . 707
Calorimètre de M. Berthelot . . . 708
Méthode de la fusion de la glace . 709
Méthode du calorimètre à glace (de Bunsen) 710
Méthodes calorimétriques à température constante 711
Méthode du refroidissement . . . 712
Chaleurs spécifiques des solides et des liquides : résultats généraux . 713
Formules empiriques. — Chaleur spécifique moyenne et chaleur spécifique vraie 715
Lois relatives aux chaleurs spécifiques des atomes 716
Chaleur spécifique des dissolutions salines étendues 717

Chaleurs spécifiques des gaz . . . 717

Définitions 717
Détermination de la chaleur spécifique des gaz (sous pression constante) 717
Résultats généraux 721

Chaleurs de fusion et de vaporisation 721

Chaleur de fusion : définition et méthodes de mesure 721
Méthode des mélanges 721
Expériences de Person 722
Chaleur de fusion de la glace . . . 723
Chaleur de vaporisation 723
Expériences de Despretz 724
Chaleur totale de vaporisation. — Formules empiriques de Regnault 725
Chaleur de vaporisation des gaz liquéfiés 726

Chaleur dégagée dans les réactions chimiques. — Chaleur de combustion . . . . . [illegible]
Bombe calorimétrique de M. Berthelot . . . . . [illegible]
Pyrhéliomètre . . . . . [illegible]

CH. XIII. — *Conductibilité calorifique des solides, des liquides et des gaz* . . . . . [illegible]

Propagation de la chaleur par conductibilité . . . . . [illegible]
Conductibilité des solides . . . . [illegible]
Coefficients de conductibilité. — Théorie de Fourier . . . . . [illegible]
Expériences de Despretz . . . . . [illegible]
Expériences de Wiedemann et Franz . . . . . [illegible]
Conductibilité des liquides . . . [illegible]
Expériences de M. A. Berget . . . [illegible]
Conductibilité des gaz . . . . . [illegible]
Convection . . . . . [illegible]

CH. XIV. — CHALEUR RAYONNANTE . . [illegible]

Propagation de la chaleur par rayonnement . . . . . [illegible]

Définitions préliminaires . . . . [illegible]
Caractères physiques du rayonnement . . . . . [illegible]
Intensité de la chaleur rayonnante. — Lois . . . . . [illegible]
Vitesse de refroidissement : loi de Newton . . . . . [illegible]
Équilibre mobile de température ou hypothèse de Prévost . . . . [illegible]

Réflexion et diffusion. — Pouvoirs réflecteur et diffusif. — Pouvoirs absorbant et émissif . [illegible]

Réflexion de la chaleur rayonnante. — Lois . . . . . [illegible]
Miroirs ardents . . . . . [illegible]
Réflexion apparente du froid . . . [illegible]
Réflexion irrégulière ou diffusion de la chaleur rayonnante . . [illegible]
Pouvoir réflecteur . . . . . [illegible]
Pouvoir diffusif . . . . . [illegible]
Pouvoir absorbant . . . . . [illegible]
Pouvoir émissif . . . . . [illegible]
Comparaison des pouvoirs absorbants et des pouvoirs émissifs . [illegible]
Applications . . . . . [illegible]
Pouvoirs diathermanes . . . . . [illegible]

Résultats relatifs aux pouvoirs diathermanes. 751
Diathermanéité des gaz. 752
Conséquences et applications des pouvoirs diathermanes. 752
Analyse des radiations calorifiques. — Thermochrose 755

Ch. XV. — *Application des lois de la chaleur. — Chauffage et ventilation* 755

Différentes sortes de chauffage . . 755
Cheminées. 755
Tirage des cheminées. 754
Poêles. 755
Chauffage à la vapeur. 756
Chauffage par l'air chaud. 756
Chauffage par circulation d'eau chaude 757

Ch. XVI. — *Notions élémentaires de thermodynamique*. 759

Chaleur dégagée ou absorbée par les actions mécaniques. 759
Corrélation entre la chaleur et le travail. 762
Principe de l'équivalence de la chaleur et du travail. 762
Équivalent mécanique de la calorie et équivalent calorifique du kilogrammètre 762
Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur : méthodes directes de détermination . . . 765
Expériences de Joule. 765
Méthodes indirectes 765
Détermination de $\frac{C}{c}$ 767
Principe de Carnot. 770
Cycle de Carnot 772
Températures absolues. 772
Travail musculaire et chaleur animale. 773

Ch. XVII. — *Machines thermiques*. 774

Définitions. 774
Générateurs de vapeur 774
Chaudière à bouilleurs. 776
Chaudières semi-tubulaires. . . . 777
Chaudières tubulaires. 778
Chaudières dites à génération instantanée 778
Chaudières locomotives. 778
Machines à vapeur proprement dites 778
Mécanisme de la machine à balancier. 781
Organes accessoires des machines à vapeur 783
Rendement des machines à vapeur. 785
Détente de la vapeur. — Machines à simple détente : système Clapeyron 786
Perfectionnements apportés aux machines à vapeur. 787
Perfectionnements au mécanisme des machines à simple détente. 787
Machine à vapeur horizontale fixe. 791
Perfectionnements apportés aux condenseurs. 791
Machines marines 792
Coulisse de Stephenson 792
Machines locomotives. 792
Locomobiles. 795
Machines à air chaud. 796
Moteurs à gaz 798
Évaluation du travail fourni par les moteurs thermiques. 799
Frein de Prony. 802
Indicateur de pression. 805

LIVRE IX

MAGNÉTISME

Ch. I. — *Propriétés des aimants*. 805

Aimants naturels, aimants artificiels : *définitions*. 805
Pôles et ligne neutre. — Points *conséquents* 805
Aiguilles aimantées 806
Distinction des pôles 806
Actions mutuelles des pôles. . . 807
Théorie du magnétisme 808
Force coercitive 809
Distinction des substances magnétiques et des aimants. 809
Aimantation par influence. — Fan-

tômes magnétiques 810
Lignes de force et champ magnétique 811
Lois des attractions et des répulsions magnétiques. 812
Formule des lois de Coulomb. — Unité de magnétisme 812
Intensité d'un champ magnétique 813
Champ magnétique terrestre. . . 815
Définition précise des pôles. . . 815
Moment magnétique d'un barreau aimanté. — Intensité d'aimantation. 814
Expériences de Gauss. — Vérification de la loi de Coulomb. . . . 814
Potentiel magnétique 815
Action des aimants sur tous les corps. — Substances diamagnétiques 815

Ch. II. — *Magnétisme terrestre.* 816

Boussoles de déclinaison et d'inclinaison 816
Action de la terre sur les aimants. — Couple terrestre. 816
Direction du couple terrestre. — Méridien magnétique. — Déclinaison et inclinaison. 817
Mésure de la déclinaison et de l'inclinaison. 818
Principe des méthodes de mesure : Décomposition du couple terrestre. 818
Boussole de déclinaison. 819
Causes d'erreur et corrections : Méthode du retournement. . . 821
Boussole marine. 822
Variations de la déclinaison. . . 825
Boussole d'inclinaison 825
Variations de l'inclinaison. . . . 825
Mesure de l'intensité du magnétisme terrestre. 825
Moment magnétique des barreaux aimantés 826
Aiguille et système astatiques. . 827

Ch. III. — *Distribution du magnétisme dans les barreaux aimantés. Procédés d'aimantation.* 827

Distribution du magnétisme. . . 827

Expériences de Coulomb. 827

Procédés d'aimantation 828

Sources et méthodes d'aimantation. — Saturation. 828
Aimantation par les aimants . . . 829
Aimantation par l'action de la terre 831
Aimants composés ou faisceaux magnétiques. 832
Armures des aimants. 832
Force portative des aimants. . . 833
Aimants Jamin. 834

LIVRE X

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

Ch. I. — *Principes fondamentaux* 835

Définitions. — Historique. 835
Électroscopes 836
Conductibilité électrique. 837
Corps bons conducteurs et corps mauvais conducteurs. 837
Isoloirs, réservoir commun. . . . 838
Distinction de deux électricités. . 839
Production simultanée des deux électricités 839
Électrisation par frottement. . . 840
Équivalence des électricités contraires développées simultanément 841
Influence électrique. 841
Théorie de l'électrisation. 842

Ch. II. — *Mesure des forces électriques. — Loix de Coulomb.* . 845

Lois des attractions et des répulsions électriques. 845
Vérification expérimentale des lois de Coulomb 845
Vérification de la loi des masses. 847
Loi élémentaire des actions électriques 847
Expression mathématique de la loi de Coulomb. — Unité de quantité d'électricité. — Unité de

charge électrique. — Coulomb. 847
Force électrique. — Champ électrique 848
Composantes de la force en un point du champ électrique. . . 849

Ch. III. — *Distribution et déperdition de l'électricité* 850

Distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs. 850
Densité électrique. 851
Expériences de Coulomb. 852
Action d'un conducteur chargé d'électricité en équilibre. . . . 853
Action protectrice d'une enceinte conductrice. — Chambre protectrice de Faraday. 853
Communication et distribution de l'électricité sur les corps en contact 854
Déperdition de l'électricité. . . . 855

Ch. IV. — *Conséquences des lois de Coulomb. — Notions fondamentales sur le potentiel électrique*. 856

Potentiel d'un conducteur électrisé : définition expérimentale. 856
Définition mathématique du potentiel électrique en un point. 858
Propriétés du potentiel. 859
Potentiel en un point dû à un système quelconque de masses électriques. 861
Surfaces équipotentielles ou surfaces de niveau. 862
Lignes de force. 863
Condition d'équilibre électrique sur un conducteur. 865
Potentiel des conducteurs électrisés 864
Expression de la densité en un point d'un conducteur électrisé en équilibre. 864
Flux de force 865
Théorème de Gauss. 866
Applications 866
Conducteurs électrisés communicants 868
Capacité électrique. 868
Unités de capacité électrique : unité absolue (C. G. S.) et unité *pratique*. 869
Partage de l'électricité entre divers conducteurs. — Équations de l'équilibre électrique 869
Conséquences et cas particuliers . 870
Calcul de l'énergie à dépenser pour charger un conducteur à un potentiel déterminé. 871

Ch. V. — *Influence électrostatique* 872

Influence sur les corps bons conducteurs. 872
Quantité d'électricité induite : théorème de Faraday 874
Influence d'une surface électrisée fermée sur un point intérieur. . 876
Conséquences du théorème de Faraday 876
Influence sur les corps mauvais conducteurs, pénétration dans leur masse. 877
Communication de l'électricité à distance. — Décharge disruptive et décharge conductive. 877
Mouvements des corps électrisés . 878
Théorie de l'influence électrostatique 879

Ch. VI. — *Condensation de l'électricité*. 880

Étude expérimentale et théorie. . 880

Condensation et condensateurs . . 880
Condensateur d'Æpinus. 880
Carreau fulminant 885
Bouteille de Leyde 884
Distribution de la charge : expérience de Franklin 885
Jarres et batteries électriques. . . 886
Batterie en cascade. 889
Électroscope condensateur de Volta 889
Bouteille de Lane ou électromètre à décharge 890
Théorie de la condensation électrique. — Cas du condensateur sphérique 891
Pouvoir inducteur spécifique. — Expériences de Faraday. 894
Condensateurs ordinaires. 894

Ch. VII. — *Machines électriques*. . 896

Définitions et classifications. . . . 896
Machine électrique de Ramsden. . 895
Principe des machines à influence. — Historique 900

Électrophore (de Volta). 900
Machine diélectrique de Carré . . 902
Machine électrique de Holtz . . . 905
Machine de Wimshurst. 907
Remarques sur la théorie des machines électrostatiques. 910

Ch. VIII. — *Effets des machines électriques et des condensateurs. — Expériences classiques*. . . . 911

Effets des machines électriques . . 911

Étincelle électrique 911
Expériences du tabouret électrique. 913
Carillon électrique. 913
Tourniquet et vent électriques . . 914
Réversibilité des machines électriques 915

Effets des condensateurs. — Expériences classiques 916

Effets divers des décharges électriques 916
Effets physiologiques. 916
Effets lumineux dans les gaz raréfiés : lueurs et décharges dans l'œuf électrique 916
Effets lumineux dans le vide : phé-

LIVRE X

ÉLECTRICITÉ DY

Ch. I. — *Pile voltaïque* 933

Historique et généralités 933

Piles voltaïques 933
Historique de la pile 934
Distribution des potentiels dans la pile de Volta. 936
Définitions fondamentales. 938

Ch. II. — *Conductibilité électrique. — Lois de Pouillet. — Formule d'Ohm*. 939

Définitions. 939
Lois des conducteurs équivalents. 939
Conséquences de la loi des conducteurs équivalents. 940
Unités de résistance électrique : unité absolue et unité pratique (*ohm*) 941

Problème du pont 954
Loi de Joule et phénomène de Feltier. — Puissance de la pile. . . 954

Ch. III. — *Modifications de la pile de Volta. — Piles à courant constant*. 955

Affaiblissement et variabilité du courant dans les piles voltaïques. 955
Piles à courant constant. 956
Pile de Becquerel. 957
Modifications de l'élément Becquerel. 958
Pile de Bunsen. 959
Élément Marié-Davy. 960
Pile au bichromate à deux liquides. 960
Piles à un seul liquide avec dépolarisant liquide. — Pile au bichromate 961
Pile à un seul liquide, avec dépolarisant solide. — Pile de Leclanché 961
Piles étalons. 963

Ch. IV. — *Effets divers des courants continus : effets physiologiques. — Effets chimiques et électrolyse*. 965

Effets physiologiques. 965

Actions sur les nerfs et sur les muscles. 965

Effets chimiques. — Lois de l'électrolyse. 966

Expérience fondamentale : Décomposition de l'eau dans le voltamètre. 966
Lois expérimentales de l'électrolyse. 967
Électrolyse des composés binaires. 968
Électrolyse des sels. 969
Lois de Faraday. 969
Travail absorbé par l'électrolyse. — Force électromotrice de polarisation 970
Effets secondaires d'électrolyse . . 971
Théorie de Grotthuss. 972

Ch. V. — *Effets mécaniques des courants. — Électrodynamique*. 972

Effets mécaniques des courants. — Actions mutuelles entre les courants électriques. 972

Déplacement des courants par les courants. 973

Lois des courants parallèles. . . . 973
Commutateur de Bertin 974
Lois des courants angulaires. . . . 975
Lois des courants sinueux. 976

Orientation des courants par les courants. 977

Action d'un courant indéfini sur un courant perpendiculaire à sa direction 977
Conséquences. 978
Action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant rectangulaire ou circulaire 979

Rotation des courants sous l'influence des courants. 980

Rotation d'un courant horizontal fini sous l'influence d'un courant rectiligne horizontal indéfini 980
Rotation d'un courant horizontal fini sous l'influence d'un courant circulaire horizontal. 980
Rotation d'un courant vertical sous l'influence d'un courant circulaire horizontal. 981
Loi élémentaire. — Calcul d'Ampère. 982
Conséquences. 982

Courant terrestre 983

Action de la terre sur les courants. 983
Orientation des courants verticaux. 983
Rotation des courants horizontaux, mobiles autour d'un axe vertical. 984
Position du courant terrestre. . . 985
Orientation des courants fermés, mobiles autour d'un axe vertical. 985
Courants astatiques. 986

Ch. VI. — *Effets mécaniques des courants*. 986

Électromagnétisme. 986

Effets mécaniques des courants sur les aimants 986
Orientation des aimants par les courants. 986
Orientation des courants par les aimants 987

Rotation des aimants sous l'influence des courants. 987
Rotation des courants sous l'influence des aimants. 989
Effets de déplacement. 990
Loi élémentaire. — Formule de Laplace 990
Expressions diverses de la formule de Laplace et applications . . . 990
Rotation électrodynamique et électromagnétique des liquides. . . 991

Solénoïdes. 992

Solénoïdes et cylindres électrodynamiques 992
Action des courants sur les solénoïdes. 993
Action directrice de la terre sur les solénoïdes 993
Actions mutuelles des aimants et des solénoïdes. 994
Actions mutuelles des solénoïdes. 994
Théorie d'Ampère sur le magnétisme 995
Différence entre les solénoïdes et les aimants 995
Direction des courants d'Ampère dans les aimants. 996
Courant terrestre. 996

Application de l'électromagnétisme. Système des unités électriques absolues C. G. S. . . . 996

Définitions. 996
Unités absolues C. G. S. électromagnétiques. 997
Unités électromagnétiques secondaires 998

Ch. VII. — *Effets physiques des courants* 1000

Aimantation par les courants, électro-aimants. 1000

Aimantation par les courants. . 1000
Procédé d'aimantation. 1000
Électro-aimants. 1001
Magnétisme rémanent. 1002
Définitions fondamentales : Perméabilité magnétique. — Induction spécifique. — Champ magnétisant. — Force magnétomotrice. — Réluctance. — Circuit magnétique. — Ampère-tour. — Hystérésis. 1002
Calcul d'un électro-aimant. . . . 1003

version. 1026
Lois des forces électromotrices thermo-électriques 1026
Origine des courants thermo-électriques. — Effet Peltier. . . . 1027
Thermomultiplicateur 1028
Pinces thermo-électriques. — Aiguille thermo-électrique. . . . 1030

Ch. X. — *Induction électrodynamique* 1030

Définitions 1030
Induction voltaïque 1031
Induction magnétique ou magnéto-électrique 1033
Loi de Lenz. 1033
Magnétisme d'Arago ou magnétisme de rotation 1034
Induction tellurique 1035
Induction leyde-électrique. . . . 1036
Self-induction et extra-courants . 1037
Expériences de Faraday 1037
Propriétés des courants induits . 1038
Induction en circuit ouvert . . . 1038
Analyse expérimentale de l'induction, ... 1038
Unité C. G. S. électromagnétique de force électromotrice et unité pratique (*volt*) 1040
Loi de Neumann. 1040

Ch. XI. — *Applications de l'induction voltaïque*. 1041

Bobine de Ruhmkorff et transformateurs. 1041

Bobine d'induction de Ruhmkorff 1041
Organes accessoires de la bobine de Ruhmkorff. 1044
Interrupteur à mercure (de Foucault) 1045
Transformateurs : type Zypernowski. 1046
Effets de la bobine de Ruhmkorff 1047
Effluve électrique. 1049
Application de la bobine de Ruhmkorff. — Fusée de Stateham . . 1050

Ch. XII. — *Nouvelles applications de l'induction. — Effets de capacité et de self-induction : décharges oscillantes* 1051

Décharges oscillantes. — *Définitions*. 1051
Expériences de Feddersen et de M. Lodge 1051
Expériences de M. Paalzow. . . . 1052
Expériences de M. Hertz. 1052
Expériences de M. Tesla. 1053
Expériences physiologiques des décharges oscillantes 1054
Expériences d'Elihu Thomson . . 1054

Ch. XIII. — *Applications de l'électromagnétisme et de l'induction* 1055

Machines et moteurs électromagnétiques. 1055

Définitions 1055
Généralités sur les courants alternatifs. 1056
Machine de Clarke 1057
Machine de Siemens. 1061
Machine de Gramme à courants continus 1062
Machine de Gramme à courants continus : type d'atelier. . . . 1165
Excitation des machines à courant continu 1067
Type nouveau de machine de Gramme à courant continu : Modèle Limb et Gianotti . . . 1069
Machine de Gramme à courants alternatifs, ou machine à lumière 1069
Réversibilité des machines dynamo-électriques 1070
Moteurs électriques. — Transport de l'énergie mécanique 1071
Étude du rendement des moteurs électriques. 1071
Transport de l'énergie par les machines à courants alternatifs. . 1072

Ch. XIV. — *Applications de l'électrolyse* 1073

Galvanoplastie et électrochimie. — Accumulateurs. 1073

Définition. 1073
Galvanoplastie proprement dite . 1073
Électrotypie. 1076
Électrochimie. — Opérations préliminaires 1076
Dorure galvanique. 1077
Argenture 1078
Nickelure. 1078
Dépôts métalliques divers 1079
Sources d'électricité employées . 1079
Applications diverses 1080

Accumulateurs électriques . . . 1081
Piles primaires et piles secondaires. — Accumulateurs . . . 1081
Accumulateurs et batteries secondaires Planté 1081
Batteries secondaires Planté. . . 1082
Formation des accumulateurs. — Modifications de l'accumulateur Planté 1083
Constantes des accumulateurs au plomb 1084
Accumulateur Peyrusson 1084
Accumulateur Gadot 1085
Instruction pour l'entretien des accumulateurs 1085

Ch. XV. — *Applications industrielles*. 1087

Éclairage électrique 1087
Régulateurs, bougies et lampes électriques 1087
Charbons employés pour l'arc voltaïque 1088
Force électromotrice de l'arc voltaïque 1088
Régulateur Foucault et Dubosq. . 1088
Régulateur Serrin. 1090
Principe des régulateurs polyphotes ou à division. 1090
Lampe à arc Japy-Helmer. . . . 1091
Bougie électrique Jablochkoff . . 1092
Brûleur Jamin 1095
Lampes électriques à incandescence sans combustion . . . 1095
Lampe Edison. 1095

Ch. XVI. — *Applications industrielles de l'électricité*. 1097

Télégraphie. 1097
Définitions : télégraphes, télautographes et téléphones. 1097
Historique et principe des télégraphes électriques 1097
Classification des appareils télégraphiques 1098
Organes divers d'un télégraphe électrique 1098
Fil de ligne. 1099

MÉTÉOROLOGIE ET CLIMATOLOGIE

Ch. I. — *Météores* 1127

Objet de la météorologie. 1127

Météores aériens 1127

Vents, leur cause. 1127
Direction et vitesse des vents. . . 1127
Vents réguliers ou alizés. 1128
Région des calmes. 1129
Vents périodiques, moussons, simoun brise. 1130
Vents variables. 1130
Cyclones 1131
Tornado 1132
Trombes 1132

Météores aqueux 1135

Nuages 1135
Formation de nuage 1134
Pluie. — Pluviomètre. 1135
Brouillards 1135
Rosée, serein, gelée blanche. . . 1136
Neige, grésil, verglas. 1136
Grêle. 1137

Météores électriques. 1138

Découverte de l'électricité de l'atmosphère par Franklin. . . . 1138
Appareils pour apprécier l'électricité de l'atmosphère. 1138
Électromètre de Saussure . . . 1138
Collect de l'électricité atmosphérique de Thomson . . . 1139
Électromètre bifilaire de Palmieri. 1140
Distribution de l'électricité dans l'atmosphère et dans les nuages 1140
Éclair 1141
Bruit du tonnerre. 1142
Effets de la foudre. 1143
Paratonnerre 1143
Paratonnerre-Melsens 1143
Aurore boréale 1145

Météores lumineux 1147

Arc-en-ciel. 1147
Halos. 1147
Parhélies, cercles parhéliques, couronnes 1148

Ch. II. — *Climatologie* 1149

Température moyenne. 1149
Causes qui modifient la température de l'air. 1149
Lignes isothermes. 1150
Climats 1151
Distribution de la température à la surface du globe. 1151
Température des mers, courants marins 1153
Température des lacs et des sources. 1154
Distribution des eaux à la surface du globe. 1155

Ch. III. — *Prévision du temps*. . 1155

Observations météorologiques. . 1155
Signes du temps. 1155
Pronostics tirés des vents et des tourbillons 1155
Pronostics tirés de la hauteur du baromètre 1156
Pronostics tirés du thermomètre et de l'hygromètre. 1158
Pronostics tirés des mouvements de l'aiguille aimantée. 1158
Pronostics fournis par le spectroscope. 1158

PROBLÈMES 1159

TABLEAUX des nombres utiles pour la résolution des problèmes 1181

25840. — Imprimerie Lahure, 9, rue de Fleurus, à Paris.

B21 Ganot, A.
G19 Traité élémentaire
1894 de physique. 54785

NAME	DATE DUE